



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VÝZNAM DODÁVKY TEPLA ZE ZAŘÍZENÍ  
ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ**

IMPORTANCE OF HEAT SUPPLY FROM WASTE-TO-ENERGY PLANTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Václav Kopecký**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Ondřej Putna**

**BRNO 2019**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Václav Kopecký**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Putna**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Význam dodávky tepla ze zařízení energetického využití odpadů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Uplatnění vyrobeného tepla patří vedle výnosů za zpracování odpadů ke klíčovým prvkům ekonomické udržitelnosti projektů energetického využití odpadů. Mimo to potenciál využití tepla také úzce souvisí s dosažením požadované energetické účinnosti zařízení, což je nutnou podmínkou realizace. Vzhledem k tomu, že ve většině případů se na pokrytí poptávky po teple v síti centrálního zásobování podílí více tepelných zdrojů s různými parametry, jedná se o komplexní problém, který zahrnuje například optimální dimenzování špičkové a záložní kotelny, vhodnou strategii výroby energie a stanovení režimů provozu těchto zdrojů. Pro řešení úlohy je nutný vývoj příslušných matematických modelů pro technicko–ekonomickou analýzu.

### Cíle diplomové práce:

Seznámení se s problematikou teplárenství v kontextu dodávky tepla z potenciálních zařízení energetického využití odpadů.

Vývoj technicko–ekonomických modelů týkajících se výroby a exportu energie ze zařízení energetického využití odpadů.

Analýza faktorů souvisejících se stanovením konkurenceschopné ceny exportovaného tepla.

Posouzení možností synergie zařízení energetického využití odpadů s dalšími energetickými zdroji v rámci jedné sítě centrálního zásobování teplem.

**Seznam doporučené literatury:**

WERNER, Sven. International review of district heating and cooling. Energy. 2017. 137, 617–631. ISSN 0360-5442.

CONNOLLY, David, Brian Vad MATHIESEN, Poul Alberg ØSTERGAARD, Bernd MÖLLER, Steffen NIELSEN, Henrik LUND, Urban PERSSON, Sven WERNER, Jan GRÖZINGER, Thomas BOERMANS a další, 2013. Heat Roadmap Europe 2050: Second pre-study for the EU27. Aalborg University.

KARAFIÁT, Josef a kol. Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. Praha, Česká Republika: Ortep, s.r.o., 2006.

LIU, Mingxi, Yang SHI a Fang FANG. Combined cooling, heating and power systems: A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. 35, 1–22. ISSN 1364-0321.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**Prohlašuji, že tuto práci jsem vypracoval samostatně, za použití informací, které mi byly poskytnuty při odborných konzultacích nebo jsem je získal z uvedených literárních či jiných zdrojů.**

---

**Václav Kopecký**

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval zejména vedoucímu práce Ing. Ondřeji Putnovi za trpělivost a cenné rady. Dále bych rád poděkoval rodině za vytvoření zázemí, které mi umožnilo absolvovat celé vysokoškolské studium.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na identifikaci hlavních faktorů, které ovlivňují využitelnost tepelné a elektrické energie vyrobené z odpadu. V rámci práce byla provedena rešeršní studie na téma odpadového hospodářství, energetického využití odpadu a dále také teplárenství a sítí centrálního zásobování teplem, které jsou významné z hlediska ekonomiky provozu zařízení pro energetické využití odpadu. Dále byly v rámci práce zkoumány faktory limitující výstavbu těchto zařízení pomocí matematických modelů upravených pro konkrétní geografické lokality.

## **Summary**

This thesis is focused on identifying main factors influencing economical rentability of energy generated using incineration of municipal waste. Research was conducted focusing on municipal waste management, waste-to-energy possibilities and the issue of district heating systems, which are important considering the economy of waste-to-energy plants. Main limiting factors were identified using mathematic models adjusted for specific geographic locations.

## **Klíčová slova**

Odpad, odpadové hospodářství, energetické využití odpadu, spalování, centrální zásobování teplem, optimalizace, analýza

## **Keywords**

Waste, waste management, waste-to-energy, incineration, district heating, optimization, analysis

KOPECKÝ, Václav. *Význam dodávky tepla ze zařízení energetického využití odpadů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117967>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ondřej Putna.

# Obsah

Úvod .....	3
1. Komunální odpad jako zdroj energie .....	4
1.1. Produkce odpadů v ČR.....	4
1.2. Nakládání s odpady v ČR.....	6
1.2.1. Skládkování, recyklace a kompostování.....	7
1.2.2. Spalování a EVO .....	9
1.3. Odpad z hlediska legislativy .....	11
1.3.1. Odpad z hlediska legislativy ČR.....	11
1.3.2. Odpad z hlediska legislativy EU.....	14
2. Zásobování teplem .....	15
2.1. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla .....	15
2.1.1. Základní principy KVET .....	15
2.1.2. Zařízení pro KVET .....	17
2.2. Centrální zásobování teplem .....	18
2.3. Poptávka po teple v rámci CZT.....	20
3. Zařízení pro energetické využití odpadu.....	22
3.1. Popis činnosti .....	22
3.2. Omezení výstavby a provozu.....	23
3.2.1. Emisní limity.....	23
3.2.2. Další omezení.....	26
3.3. Ekonomika ZEVO.....	27
4. Integrace ZEVO do existující sítě CZT .....	29
4.1. Metody integrace ZEVO .....	29
4.2. Technicko-ekonomický model HCCP .....	32
5. Popis uvažovaných lokalit .....	34
5.1. Elektrárna Dětmárovice .....	34
5.1.1. Technologické řešení.....	34
5.1.2. Poptávka po teple .....	37
5.2. Elektrárna Mělník I .....	38
5.2.1. Technologické řešení Mělník.....	38
5.2.2. Poptávka po teple – Mělník.....	39
6. Technicko-ekonomické modely.....	40
6.1. Investiční náklady .....	40

6.2. Model Dětmarovice .....	42
6.2.1. Cena paliva .....	42
6.2.2. Parní turbíny .....	43
6.2.3. Porovnání investičních a provozních nákladů .....	44
6.2.4. Analýza podstatných faktorů ovlivňujících ceny tepla .....	48
6.3. Model Mělník I .....	55
Závěr .....	58
Seznam použitých symbolů a zkratek .....	59
Bibliografie .....	60



## Úvod

Odpadové hospodářství je zvláště v dnešní době zcela klíčovým prvkem, který musí každá země řešit. Historicky existuje mnoho strategií, jak nakládat s odpadem. Pokud chceme hledat optimální způsoby nakládání s odpady, je třeba celou problematiku posuzovat z mnoha hledisek. Pohledy mohou být čistě environmentální, jako je snaha omezit negativní vlivy člověka na okolní prostředí, nebo například ekonomické. Průnikem těchto pohledů se zdá být energetické využití odpadu. Odpad je při něm likvidován relativně ekologickou cestou, a přitom je také využit a ekonomicky zhodnocen.

Jak bude postupně popsáno v této práci, pro udržení ekonomické rentability zařízení pro energetické využití odpadu je vhodné umístit zařízení do blízkosti sítě centrálního zásobování teplem. V ČR existuje pro tato zařízení obrovský potenciál, zejména kvůli vysokému procentu domácností, které jsou na tyto sítě připojeny. Ekonomické plánování těchto zařízení však představuje velmi komplexní problém. Z tohoto důvodu jsou pro odhad ekonomické rentability těchto zařízení neustále vyvíjeny technologicko-ekonomické modely, které mají zaručit kvalitní plánování a solidní odhad návratnosti relativně vysokých finančních investic.

V rámci této práce bude představena problematika odpadového hospodářství, zejména z pohledu ČR a jejího umístění v rámci okolních zemí v Evropě. Dále je v práci položeno zpracování odpadu do kontextu problematiky teplárenství. Práce si dále klade za cíl identifikovat některé další faktory, které ovlivňují ekonomickou rentabilitu zařízení pro energetické využití odpadu. K tomu je v této práci využito několik technologicko-ekonomických modelů, vyvinutých na Ústavu procesního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně.

Limitující faktory jsou zkoumány na dvou rozdílných lokalitách. Ty se liší především velikostí poptávky po tepelné energii a také parametry již existujících tepelných zdrojů. V obou lokalitách je přitom reálně uvažováno o výstavbě zařízení na energetické využití odpadu. Na závěr práce jsou představeny zjištěné skutečnosti, které mohou sloužit jako vstupní údaje pro vytváření budoucích ekonomických rozvah výstavby těchto zařízení v různých lokalitách.

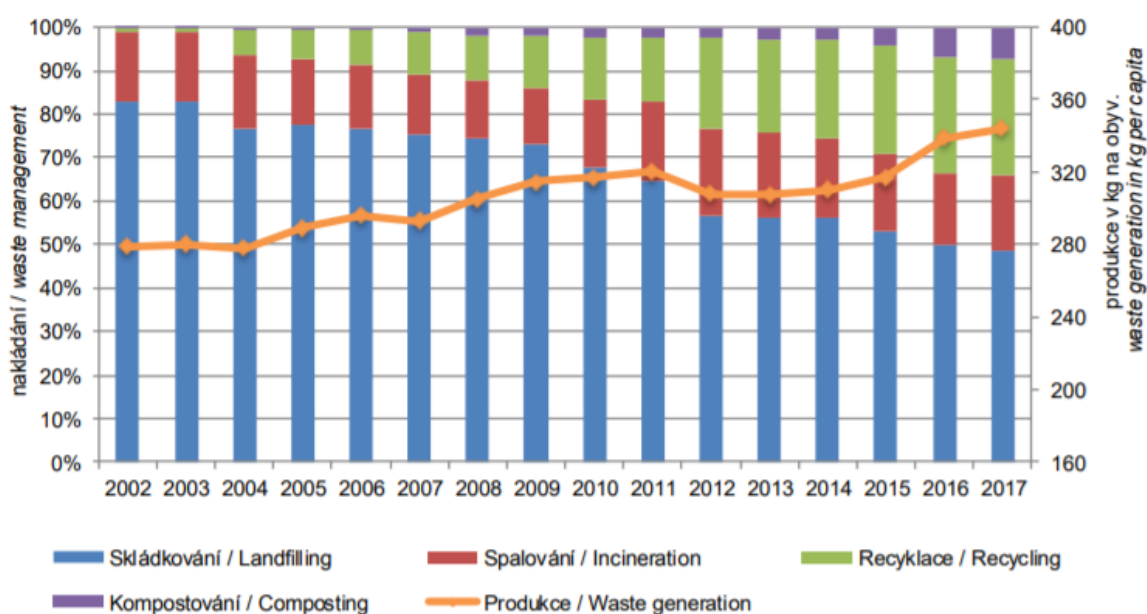
# 1. Komunální odpad jako zdroj energie

Tato kapitola bude věnována především popisu toho, co se vlastně obecně rozumí pod pojmy, jako je komunální odpad (dále jen KO), směsný komunální odpad (dále jen SKO), odpadové hospodářství, skládkování a především energetické využití odpadu (dále jen EVO). Odpad je komodita, kterou člověk během své činnosti neustále tvoří. Mnohé studie [1] o EVO mluví jako o možnosti snížit v budoucnu emise například skleníkových plynů [2] při minimálním růstu nákladů za nakládání s odpadem. Kapitola se zaměří na současnou produkci odpadu, způsoby nakládání s odpadem a také v ní bude zmíněno, co je vlastně pod pojmem odpad rozuměno z hlediska české, respektive evropské legislativy.

## 1.1. Produkce odpadů v ČR

Množství vyprodukovaného odpadu v daném regionu je klíčový faktor pro plánování výstavby zařízení pro energetické využití odpadu, zkráceně ZEVO. Odpad lze samozřejmě převážet, to je však rentabilní jen na určitou vzdálenost, nehledě na to, že může dojít k přetížení dopravní infrastruktury „zbytečným“ převážením, pokud není ZEVO plánováno s dobrou poziční rozvahou. Z hlediska EVO se vyplatí mluvit zejména o SKO, neboť tvoří majoritní složku odpadu, který nelze využít jinak než energeticky. Také je však potřeba zmínit například energeticky významný tzv. objemný odpad a další spalitelné komunální odpady, jako je papír či plast. Detailněji se kategorizací odpadu zabývá podkapitola 1.3. Dostatečná produkce SKO je tedy důležitá z hlediska vytváření ekonomických prognóz provozu ZEVO.

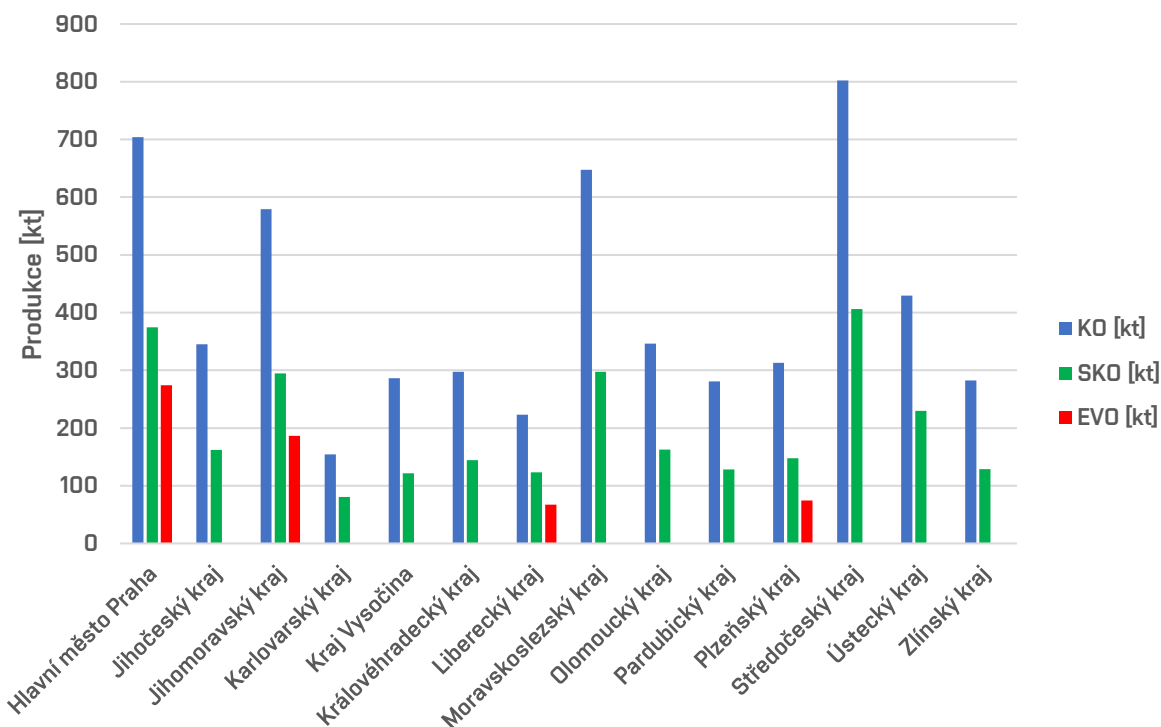
Jak lze vidět na Obr. 1.1, produkce směsného komunálního odpadu se v České republice každým rokem zvyšuje. Data, převzatá z [3], existují „pouze“ do roku 2017. Zdroj data za



Obr. 1.1 Produkce a nakládání s odpady v ČR v letech 2002–2017, převzato z [3]

minulý rok zveřejňuje až v říjnu roku následujícího. Aktuální data za uplynulý rok 2018 tedy nejsou k dispozici, dalo by se však očekávat, že trend produkce a nakládání s odpady bude podobný, jako v minulých letech.

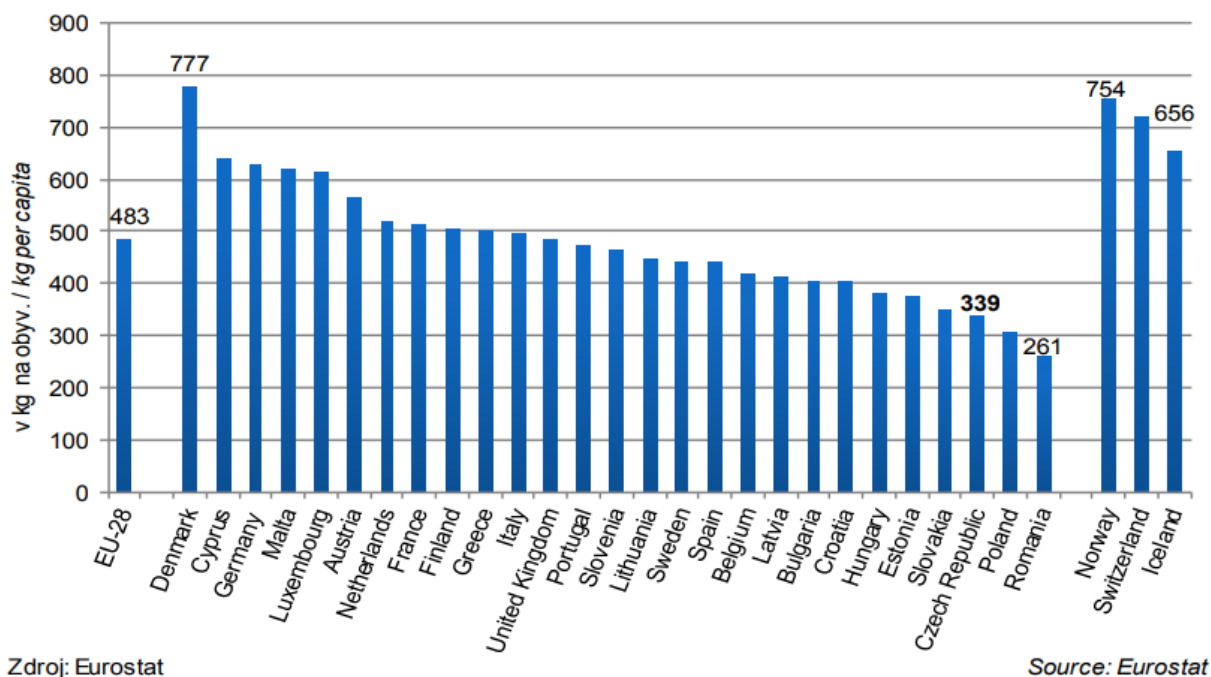
Na Obr. 1.1 je dále vidět, že podíl odpadu, který je likvidován jiným způsobem než stále populárním skládkováním, se každý rok zvyšuje. Pro umístění ZEVO je ale důležité i rozložení producentů odpadu na území ČR. Na grafu na Obr. 1.2 je tedy vyobrazena celková



Obr. 1.2 Produkce odpadů v jednotlivých krajích ČR za rok 2017 [4]

produkce odpadů [4] v jednotlivých krajích České republiky. Jedná se konkrétně o produkci komunálního odpadu, směsného komunálního odpadu a odpadu, který je energeticky využíván (v grafu jako KO, SKO a EVO).

V grafu na Obr. 1.3 je položena produkce komunálních odpadů v České republice do kontextu ostatních zemí v Evropě [3]. Jedná se převážně o země Evropské unie a pak některé další vybrané země. Data uvedená v tomto grafu jsou za rok 2016. Český statistický úřad přebírá tato data od evropského statistického orgánu „Eurostat“, který data obnovuje každé dva roky, a tedy v době vzniku této práce novější údaje neudává. I zde se však dá očekávat, že trend bude stále podobný. V grafu lze vidět, že průměrný obyvatel ČR vyprodukuje o cca 144 kg [3] komunálního odpadu méně, než průměrný obyvatel EU. To však, především v kontextu grafů na Obr. 1.1 a Obr. 1.2, vůbec neznamena, že by v ČR neexistoval potenciál pro výstavbu dalších ZEVO. V naší republice je stále ještě poměrně vysoký podíl skládkovaného odpadu. Nakládání s odpady v ČR, i v kontextu zbytku Evropy, se věnuje následující kapitola 1.2.



Obr. 1.3 Produkce komunálního odpadu na hlavu v Evropě v roce 2016, převzato z [3]

## 1.2. Nakládání s odpady v ČR

Nakládání s odpady v České republice podléhá zejména zákonu o odpadech [5] a dále pak státnímu plánu odpadového hospodářství [6]. Ty podléhají příslušné evropské legislativě. Detailnějšímu pohledu na odpad z hlediska české a evropské legislativy je věnována v této práci kapitola 1.3. Pro potřeby této kapitoly postačí uvést upřednostňovanou hierarchii nakládání s odpadem dle § 9a zákona o odpadech [5]:

- V rámci odpadového hospodářství musí být dodržována tato hierarchie způsobů nakládání s odpady, stanovená směrnicí EU (viz. podkapitola 1.3):
  1. předcházení vzniku odpadů,
  2. příprava k opětovnému použití,
  3. recyklace odpadů,
  4. jiné využití odpadů, například energetické využití,
  5. odstranění odpadů.

Energetické využití odpadů je tedy jmenovitě uvedeno až jako předposlední preferovaný způsob nakládání s odpadem. Je také nutno podotknout, že výše uvedená hierarchie není pevně platná a lze se od ní odchýlit. Stejný zákon pak přesně definuje možnosti, kdy nemusí být hierarchie dodržena, a dále co je potřeba při jejím uplatňování zohlednit. Tyto položky jsou pak v zákoně uvedeny doslova takto: [5]

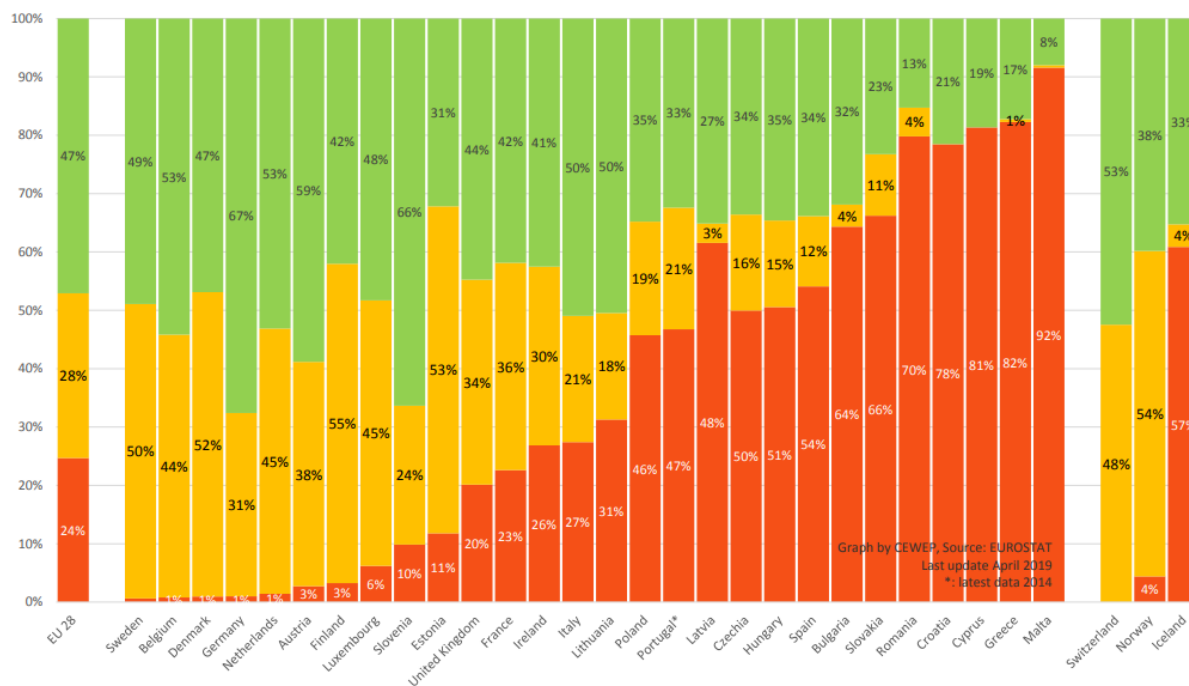
- Od hierarchie způsobů nakládání s odpady je možno se odchýlit v případě odpadů, u nichž je to podle posouzení celkových dopadů životního cyklu zahrnujícího vznik odpadu a nakládání s ním vhodné s ohledem na nejlepší celkový výsledek z hlediska ochrany životního prostředí.

- Při uplatňování hierarchie se zohlední
  1. celý životní cyklus výrobků a materiálů, zejména s ohledem na snižování vlivu nakládání s odpady na životní prostředí a lidské zdraví,
  2. technická proveditelnost a hospodářská udržitelnost,
  3. ochrana zdrojů surovin, životního prostředí, lidského zdraví a hospodářské a sociální dopady.

V této kapitole bude dále věnován prostor zejména skládkování, recyklaci a stavu EVO v České republice i v kontextu zbytku EU.

## 1.2.1. Skládkování, recyklace a kompostování

Na Obr. 1.4 je ukázáno zastoupení jednotlivých způsobů nakládání s KO v rámci zemí EU a dalších vybraných zemích. ČR by se tedy s nadsázkou dala zařadit do evropského „středu“ zemí na základě současného nakládání s odpady.



Obr. 1.4 Nakládání se SKO ve vybraných zemích v roce 2016 - červeně skládkování, oranžově EVO, zeleně recyklace, převzato z [12]

### Skládkování

Skládka odpadu je dle 183/2006 Sb. [7] „stavbou určenou pro odstranění odpadu - ukládání příslušných druhů odpadů za daných technických a provozních podmínek při průběžném monitoringu vlivu na životní prostředí.“ Dle zabezpečení lze skládky dělit na: [7]

- zabezpečené (řízené)
- nezabezpečené (tzv. ilegální - „černé“, reliktní)

Z hlediska odpadového hospodářství má samozřejmě smysl bavit se pouze o tzv. „zabezpečených“ skládkách. Ty lze pak dále dělit [7] například podle úrovně k okolnímu terénu na podúrovňové, svahové, nadúrovňové atd.

Další způsoby dělení jsou pak například dle ochrany vůči srážkám, dle způsobu uložení odpadu nebo dle doby, po kterou je odpad na skládce uložen. Z hlediska této práce však stojí dále za zmínku zejména dělení skládek dle stupně technického zabezpečení, a sice na skládky: [7]

- S-IO – skládky inertního odpadu,
- S-OO – skládky ostatního odpadu
- S-NO – skládky nebezpečného odpadu

Pro všechny skládky je vždy nutné najít vhodnou lokalitu, ať už s ohledem na bezpečnost nebo okolní obyvatele. Je potřeba najít takovou lokalitu, kde nebudou hrozit například příliš velké výkyvy počasí, nebo nebude příliš velké riziko prosakování znečišťujících látek do spodních vod. U všech druhů skládek je pak také třeba řešit technické zabezpečení, které může být zejména u skládek ostatního a nebezpečného odpadu poměrně komplikované. Jedná se konkrétně o následující způsoby zabezpečení: [7]

- Těsnění skládky
- Odvodňovací systém
- Odplynění skládky
- Provozně technická zařízení
- Zařízení pro monitoring

Pro účely technologického zabezpečení skládek (TZS) lze použít například i „škváru“, tedy biologicky stabilizované reziduum, které tvoří odpadní produkt z provozu ZEVO [8]. Z hlediska EVO dále stojí za zmínku zejména systémy pro odplynění skládky. Vlivem biochemických procesů [7] vzniká při rozkladu organických látek tzv. „skládkový plyn“. Jedná se v podstatě o méně kvalitní bioplyn [9], jehož kvalita je navíc poměrně těžko primárně ovlivnitelná (sekundárně může docházet samozřejmě k jeho čištění). Plyn je ze skládky pomocí systému potrubí odčerpáván, jednak z důvodu možné škodlivosti pro životní prostředí, obtěžování okolí silným zápachem a v neposlední řadě proto, že pokud není řešeno jeho odčerpávání, může docházet ke vznícení skládky [7]. Pokud tento plyn dosahuje určité kvality, může být spalován například v bioplynových stanicích, jak je zmíněno v následující podkapitole 1.2.2. Pokud je však plyn nekvalitní, je potřeba zbavit se ho (spalovat) často i bez energetického využití, například pomocí tzv. fléry [7]. Po vyčerpání kapacit skládky dochází k jejímu uzavření a rekultivaci, skládkový plyn je však nutné dále odčerpávat.

## Recyklace a kompostování

Recyklace neboli opětovné využití odpadu je v hierarchii nakládání s odpady nadřazena jak skládkování, tak EVO (viz úvod do kapitoly 1.2). Aby mohl být materiál opětovně využit jako surovina, je potřeba ho nejdříve tzv. „separovat“ neboli oddělit na základě druhu. O separaci lze zjednodušeně mluvit jako o dvoustupňové. V prvním stupni dochází k předtřídění KO přímo na straně producentů. Ze skupin komunálního odpadu dle katalogu odpadů (více v podkapitole 1.3.1) se v podmínkách ČR [7] separuje zejména:

- Papír (noviny, časopisy a kartony)
- Plast (fólie, PET, obaly...)
- Sklo (barevné, bílé)
- Biologicky rozložitelný odpad

Pro sběr separovaného KO jsou zpravidla využívány tzv. „barevné kontejnery“. Předtříděný KO je poté odvezen na tzv. „linky pro třídění separovaného odpadu“ [7], kde dochází k „odstranění nežádoucích příměsí, kontaminovaných materiálů a případně úpravu (lisování, drcení) separovaného odpadu“. Na linkách se uplatňuje ruční či mechanické třídění. Může být aplikována i kombinace. Vytríděné frakce KO jsou dále prodávány nejlépe dalším zpracovatelům, kteří je využívají jako surovinu.

Pro zpracování separovaného biologického odpadu slouží tzv. „kompostování“. Výsledným produktem je pak kompost, obsahující vysoký podíl humusových látek [10], který se dále používá v zemědělství jako hnojivo.

### 1.2.2. Spalování a EVO

Ve smyslu energetického využití odpadů se rozumí především využití v zařízeních pro energetické využití odpadu, triviálně nazývaných jako spalovny odpadu. V ČR jsou v současné době v provozu čtyři [11] ZEVO, konkrétně se jedná o Zařízení na energetické využití odpadů Malešice v Praze, SAKO Brno a.s., TERMIZO a.s. v Liberci, a ZEVO Plzeň. Nejstarším ZEVO je to, které se nachází na území města Brna a bylo uvedeno do provozu v roce 1989, to pražské pak bylo zprovozněno v roce 1998 a liberecké o rok později. Nejmladším zařízením na našem území je pak ZEVO v Plzni, které bylo do provozu uvedeno v roce 2016. Umístění těchto zařízení jsou patrná i v grafu na Obr. 1.2 v kapitole 1.1. Na Obr. 1.4 v předchozí podkapitole je vidět také pozice České republiky [12] v rámci vybraných zemí Evropy z hlediska množství energeticky využitého odpadu.

V tabulce 1 [11] je pak přehledně vidět, jak jsou využívány kapacity současných ZEVO. Pokud se podíváme na hodnoty nejen v tabulce, ale i na předchozích grafech, je z toho jasně vidět, že v České republice stále existuje obrovský potenciál pro stavbu dalších zařízení, která budou schopna likvidovat odpad ekologickou cestou a zároveň produkovat tepelnou, či elektrickou energii.

ZEVO	Kapacita [kt]	Spáleno za rok 2015 [kt]	Spáleno za rok 2016 [kt]	Spáleno za rok 2017 [kt]
Praha Malešice	330	313,994	307,099	294,899
ZEVO Plzeň	95	0	38,658	93,755
TERMIZO Liberec	96	91,524	97,422	91,755
SAKO Brno	248	226,387	226,857	220,653
<b>CELKEM</b>	<b>769</b>	<b>631,905</b>	<b>670,036</b>	<b>701,062</b>

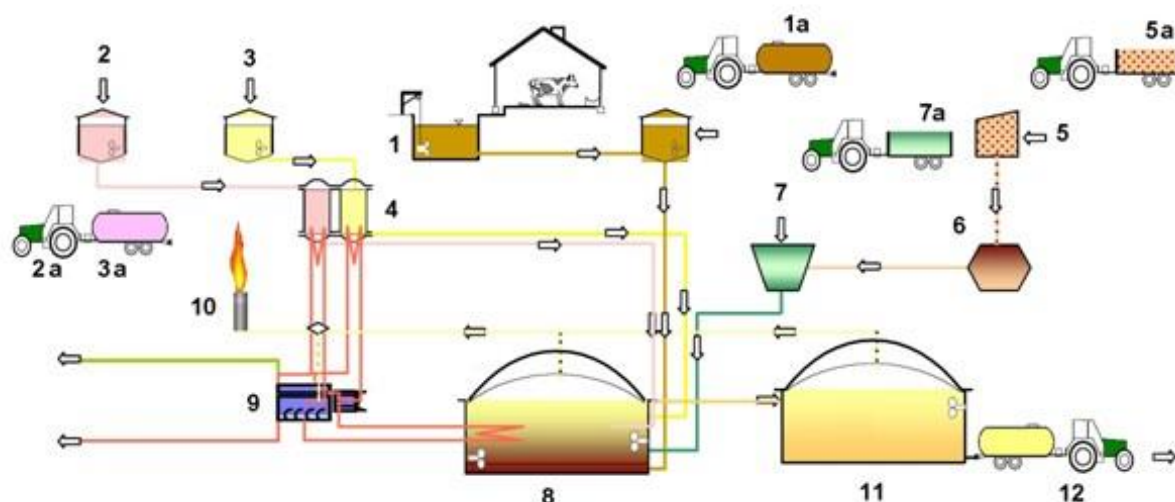
Tabulka 1 Naplnění kapacit ZEVO v ČR [11]

Energetickým využitím odpadu nemusí být ale myšleno pouze využití v rámci ZEVO. O energetickém využití odpadu se dá mluvit například i v kontextu bioplynových stanic, které mohou zpracovávat celou řadu odpadů ze skupiny 02 dle katalogů odpadů [13], tedy „odpady ze zemědělství, zahradnictví, rybářství, lesnictví, myslivosti a z výroby a zpracování potravin“ nebo dokonce i biologicky rozložitelný odpad [9] (identifikační číslo 20 02 01 dle katalogu odpadů [13]) ze skupiny komunálních odpadů. Obecně bývá toto palivo označováno jako energeticky využitelná biomasa [9]. Jedná se také o tzv. obnovitelný zdroj energie.

V bioplynové stanici dochází k rozkladu biomasy při bakteriálním procesu anaerobní digestace. „Jedná se o bioenergetickou transformaci organických látek, při které nedochází ke snížení jejich hnojivé hodnoty. Výslednými produkty jsou biologicky stabilizovaný substrát s vysokým hnojivým účinkem a bioplyn (BP) s obsahem 55–70 % metanu a výhřevností cca 18 – 26 MJ/m<sup>3</sup>.“ [9] Pro účely této práce bohatě stačí takovýto zjednodušený popis.

Jednotlivé procesní uzly v rámci modelové bioplynové stanice jsou pak znázorněny na Obr. 1.5. Je nutno podotknout, že výše zmíněné schéma procesních uzlů nepopisuje konkrétní bioplynovou stanici, ale modelový případ, kdy stanice přijímá celou škálu vstupních produktů, od zemědělských po kuchyňské (komunální [13]) odpady.

V současné době je v ČR v provozu 574 [14] bioplynových stanic o celkovém elektrickém výkonu 366 MW. Stanice zpracovávají komunální, průmyslový a zemědělský biologický



Obr. 1.5 Schéma bioplynové stanice, převzato z [9]



odpad. Dále pak stanice spalují skládkový plyn (popsaný v kapitole 1.2.1) a zbytky z čističek odpadních vod. Bioplyn pak na našem území tvoří 24 % [14] veškerých využívaných obnovitelných zdrojů energie.

### 1.3. Odpad z hlediska legislativy

Jak již bylo nastíněno v kapitole 1.2, odpad a víceméně vše okolo něj je velmi silně podchyceno buď českou, nebo evropskou legislativou. Jakýkoliv proces, který je s odpady spojen, ať už se jedná o jejich zpracování, převoz nebo odstranění, musí vyhovovat zákonem daným podmínkám. Tato část práce je tedy zaměřena obecně na legislativu spojenou s odpady a také na konkrétní legislativní omezení, která se týkají specificky ZEVO.

#### 1.3.1. Odpad z hlediska legislativy ČR

##### Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů 185/2001 Sb. [5]

Jak již bylo zmíněno, hlavním zákonem, který v Česku řídí nakládání s odpady, je zákon o odpadech. V něm je kromě hierarchie, vypsané v kapitole 1.2, definován i přesný význam toho, co se pro účely tohoto zákona pod pojmem odpad rozumí. Dle § 3 zmíněného zákona je tedy odpad definován jako „každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit“. [5]

Zákon také určuje některé podmínky, které musí ZEVO splňovat. V příloze 12 tohoto zákona je stanovena takzvaná energetická účinnost dle rovnice: [5]

$$R1 = \frac{Ep - (Ef + Ei)}{0,97 \cdot (Ew + Ef)} \quad (1)$$

- „*Ep se rozumí roční množství vyrobené energie ve formě tepla nebo elektřiny. Vypočítá se tak, že se energie ve formě elektřiny vynásobí hodnotou 2,6 a teplo vyrobené pro komerční využití hodnotou 1,1 (GJ/rok).*“
- *Ef se rozumí roční energetický vstup do systému z paliv přispívajících k výrobě páry (GJ/rok).*
- *Ew se rozumí roční množství energie obsažené ve zpracovávaných odpadech vypočítané za použití nižší čisté výhřevnosti odpadů (GJ/rok).*
- *Ei se rozumí roční dodaná energie bez Ew a Ef (GJ/rok).“*

V příloze je dále stanovena minimální energetická účinnost pro zařízení uvedená do provozu po 31. prosinci roku 2008 na 0,65. Je nutno podotknout, že R1 nevyjadřuje „klasickou“ účinnost, a tedy hodnoty energetické účinnosti R1 mohou přesahovat i hodnotu 1.

## **Vyhláška č. 93/2016 Sb. O Katalogu odpadů [13]**

V této vyhlášce jsou definovány jednotlivé skupiny odpadů. Zároveň vyhláška vymezuje postupy pro zařazování odpadů do příslušných kategorií. Dle odstavce 1 v § 4 této vyhlášky je původce odpadů nebo oprávněná osoba povinna zařadit odpady „*pod šestimístná katalogová čísla druhů odpadů uvedená v Katalogu odpadů, v nichž první dvojčíslí označuje skupinu odpadů, druhé dvojčíslí podskupinu odpadů a třetí dvojčíslí druh odpadu.*“ Dále je v tomto paragrafu popsán i postup pro takový odpad, který se do katalogu dle výše zmíněných kritérií nepodaří zařadit.

V příloze k této vyhlášce je pak uveden přímo samotný katalog odpadů. Vybrané kategorizované odpady, významné z hlediska EVO, jsou uvedeny v tabulce 2. Tučné zvýraznění značí skupiny odpadů, které jsou nejvýznamnější. Významností je myšlena buď velká výhřevnost, nebo velké zpracované množství odpadů konkrétní kategorie.

Označení	Název označení
20 01	Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01)
20 01 01	Papír a lepenka
20 01 10	Oděvy
20 01 11	Textilní materiály
<b>20 01 39</b>	<b>Plasty</b>
20 03	Ostatní komunální odpady
<b>20 03 01</b>	<b>Směsný komunální odpad</b>
<b>20 03 07</b>	<b>Objemný odpad</b>
20 03 99	Komunální odpady jinak blíže neurčené

*Tabulka 2 Vybrané odpady dle Katalogu odpadů*

## **Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. [15]**

Tento zákon je důležitý především kvůli definici pojmu „stacionární zdroj znečištění“, který zahrnuje i ZEVO. Stacionární zdroj je tedy definován jako „ucelená technicky dále nedělitelná stacionární technická jednotka nebo činnost, které znečišťují nebo by mohly znečišťovat, nejde-li o stacionární technickou jednotku používanou pouze k výzkumu, vývoji nebo zkoušení nových výrobků a procesů.“ ZEVO je pak dle přílohy č. 2 k tomuto zákonu zařazeno mezi tzv. „vyjmenované stacionární zdroje“ a jsou zde stanoveny podmínky pro provoz zařízení (například rozptylová studie, kompenzační opatření a jiné). V neposlední řadě je v zákoně také stanovena povinnost provozovatelů provádět kontinuální měření emisí.

### **Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování [16]**

V této vyhlášce jsou uvedeny především specifické emisní limity pro zdroje znečištění, včetně ZEVO. Specifickým emisním limitům pro ZEVO a jejich srovnáním s vybranými konvenčními zdroji se věnuje podkapitola 3.2.1.

### **Vyhláška č. 387/2016 Sb. o změně několika dalších vyhlášek [17]**

V této vyhlášce je především stanovena limitní výhřevnost SKO, při které nesmí být ukládán na skládky komunálního odpadu. Dle této vyhlášky musí být tedy výhřevnost SKO, který je ukládán na skládku nižší než 6,5 MJ/kg.

### 1.3.2. Odpad z hlediska legislativy EU

Je dobré zmínit i legislativu vydávanou na úrovni Evropské unie. Legislativa v rámci území ČR je jí totiž často podřízená, popřípadě jsou „evropské zákony“ v české legislativě nějakým způsobem implementovány. V této části práce jsou uvedeny hlavní evropské legislativní dokumenty, které mají význam z hlediska EVO, či odpadového hospodářství jako celku.

#### **Směrnice 2008/98/ES o odpadech a zrušení některých směrnic [18]**

Směrnice, ve které je například vymezen pojem „odpad“, nebo je stanovena hierarchie nakládání s odpadem. V legislativě ČR jsou této směrnici podřízeny [5] a [13].

#### **Nařízení 1013/2006 ze dne 14. června 2006 o přepravě odpadů [19]**

Nařízení vymezuje podmínky pro přepravu odpadu v rámci zemí EU. Udává jasné limity přípustné ekologické zátěže, která vzniká v souvislosti s přepravováním odpadu.

#### **Směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích [20]**

Směrnice stanovuje specifické emisní limity pro zdroje znečištění. V České legislativě je této směrnici podřízena především [16] a částečně i [15]. Směrnice v článku 50 dále stanovuje, že *„zařízení na spalování odpadu musí být navržena, vybavena, postavena a provozována tak, aby byl plyn vznikající při spalování odpadu po posledním vstřiku spalovacího vzduchu ohřát řízeným a stejnoměrným způsobem i za nejméně příznivých podmínek na dobu alespoň dvou sekund na teplotu alespoň 850 °C.“* a dále také, že *„pokud je spalován nebo spoluspalován nebezpečný odpad s obsahem halogenovaných organických látek, vyjádřených jako chlor, vyšším než 1 %, musí teplota požadovaná pro dosažení souladu s prvním a druhým pododstavcem dosahovat alespoň 1100 °C.“* Z povinností stanovených touto směrnicí tedy vychází některé technické specifikace, které je potřeba dodržovat při provozu ZEVO.

## 2. Zásobování teplem

Tato kapitola je věnována způsobům generování a distribuce tepla. Z hlediska ZEVO v kontextu zásobování tepelnou energií má význam mluvit především o kombinované výrobě elektřiny a tepla (zkráceně KVET). Je to například i z toho důvodu, aby byla snadněji dosažena legislativně požadovaná účinnost R1 (viz podkapitola 1.3.1). Dále to pak pomáhá ekonomice zařízení, jak je také zmíněno v podkapitole 3.3. Dalším důležitým faktorem z hlediska ZEVO je centrální zásobování teplem (zkráceně CZT). Do sítí CZT je v ČR napojeno okolo 38 % domácností [21]. To představuje velký potenciál pro výstavbu ZEVO, například i z hlediska zbytku Evropy (ve 28 zemích EU bylo v roce 2011 v průměru na SCZT napojeno pouze 16 % [1] domácností).

### 2.1. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

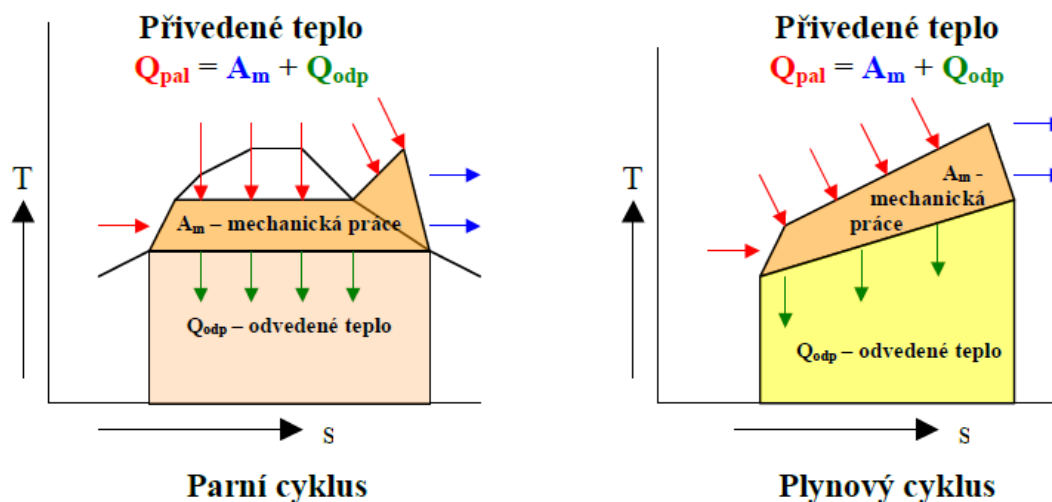
Tepelná energie může být vyráběna buď odděleně, nebo jako „odpadní“ produkt při výrobě energie elektrické. Zařízení pro výrobu energie můžeme tedy dělit na tři základní skupiny: [22]

- **Elektrárna** – produkuje primárně elektrickou energii, pokud dochází k využití odpadního tepla, pak jen velmi omezeně
- **Výtopna** – občas také označována jako „kotelna“, produkuje pouze teplo, v rámci CZT lze využít například jako špičkový zdroj tepelné energie
- **Teplárna** – produkuje jak teplo, tak elektřinu = aplikace KVET

Následující podkapitoly se zaměří především na popis principu činnosti tepláren, tedy zařízení, která KVET uplatňují. Kromě základního popisu principu a činnosti je prostor věnován i popisu základních technických zařízení, která se používají.

#### 2.1.1. Základní principy KVET

Z ekonomického i ekologického hlediska je lepší budovat zařízení, ve kterých je využíváno principu KVET. Tento princip je ilustrován na příkladech parního a plynového cyklu na Obr. 2.1. Při výrobě elektrické energie [22], která představuje nejsnadněji transformovatelnou dosud známou formu energie, je obvykle potřeba vyvinout mechanickou práci a roztočit rotor elektrogenerátoru. Na vinutí statoru pak díky principu elektromagnetické indukce vzniká elektrický proud. Rotor je v konvenčních teplárnách roztáčen turbínou, kterou pohání buď spaliny, nebo vodní pára. Základní tepelná energie pro vytvoření spalin či páry je pak obvykle dodávána spalováním paliva. V případě ZEVO je tímto palivem odpad, může se ale jednat o zemní plyn, hnědé či černé uhlí, nebo lze energii dodávat například i štěpením jader izotopu uranu.



Obr. 2.1 Princip KVET, převzato z [22]

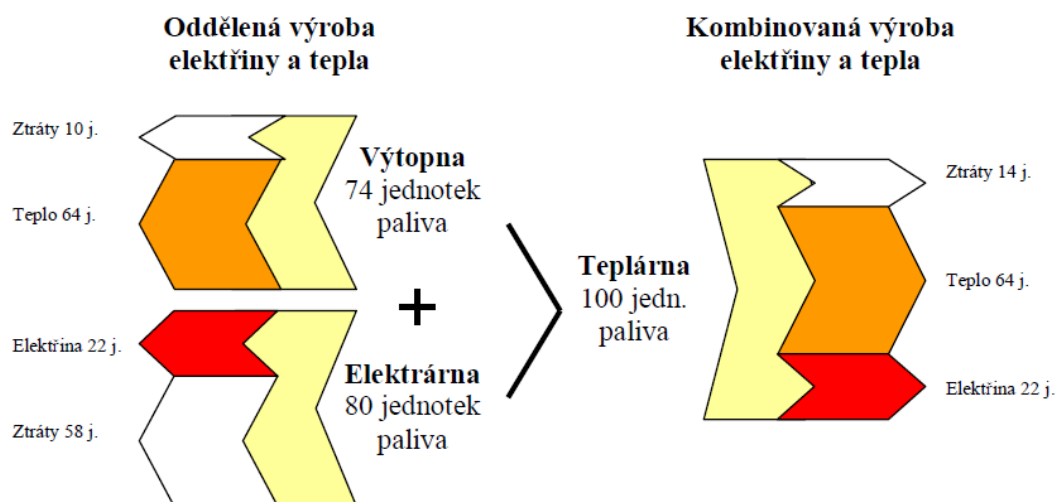
Při termickém generování mechanické práce vzniká jako mimoprodukt velké množství odpadního tepla, které musí být za normálních okolností mořeno v okolí. Při KVET je část tohoto tepla využita pro předání tepla do teplárenské soustavy za cenu mírného snížení vykonané mechanické práce. Jako základní ukazatel kvality principu KVET v teplárně slouží veličina označovaná v české literatuře tradičně jako tzv. „teplárenský modul  $\sigma$ “ [22]. Ten lze vyjádřit dle následující rovnice:

$$\sigma = \frac{E_{KVET}}{Q_{KVET}} [-] \quad (2)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

$E_{KVET}$	.....	Elektrina vyrobená v procesu KVET [GJ]
$Q_{KVET}$	.....	Teplo vyrobené v procesu KVET [GJ]

Při KVET je obvykle dosahováno daleko vyšší celkové účinnosti než při samostatné výrobě elektřiny či tepla. Výhody KVET z hlediska úspory paliva jsou ilustrovány na Obr. 2.2. Pro výrobu stejného množství jednotek elektrické a tepelné energie je při společné výrobě potřeba méně jednotek paliva. Na druhou stranu lze KVET uplatňovat především u velkých



Obr. 2.2 Výhody KVET, převzato z [22]

zdrojů. Není totiž reálné, aby měl každý lokální zdroj tepla napojení na generátor elektrické energie. K distribuci tepla do domácností nebo pro průmyslové využití, vyrobeného pomocí KVET, lze použít především síť centrálního zásobování teplem (viz podkapitola 2.2 níže).

### 2.1.2. Zařízení pro KVET

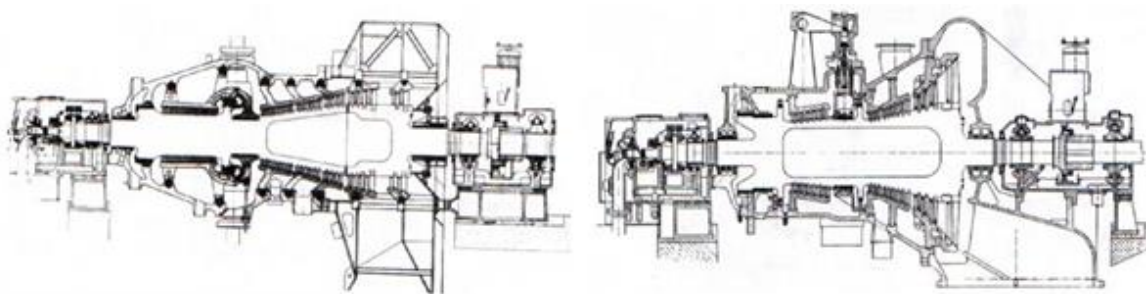
V této podkapitole je věnován krátký prostor především dvěma typům technického řešení KVET z pohledu parních turbín. Jedná se o turbínu protitlakovou a parní odběrovou, které lze pak dále využít v rámci ZEVO. Systémy jsou popsány jen velmi stručně, což je však pro účely této práce postačující.

#### Protitlaková turbína

Parní turbína je stroj, který přeměňuje vnitřní energii páry na mechanickou práci [22]. Pára o relativně vysokých parametrech po vstupu do turbínového soustrojí prochází přes lopatky turbíny a postupně expanduje. Tím snižuje svoji vnitřní energii (jak lze vidět na T-s diagramu parního cyklu, na Obr. 2.1. v předchozí podkapitole). Na posledním stupni pára ze soustrojí vystupuje, stále si však zachovává relativně vyšší parametry. Pára na výstupu je dále využívána pro dodávky tepla, ať již přímo ve formě páry, nebo pro ohřev teplonosné vody ve výměníku tepla [22]. Platí zde závislost, že čím vyšší jsou parametry páry na výstupu, tím nižší je podíl vyrobené elektřiny. Zkráceně bývá označována jako PT.

#### Parní odběrová turbína

Princip funkce je velmi podobný jako u protitlakové turbíny [22]. Pára při průchodu turbínovým soustrojím expanduje a postupně snižuje svoji vnitřní energii. V místě, kde má pára ještě dostatečnou vnitřní energii, aby mohla být dále použita k teplotěnským účelům, je část páry odebírána. Odběr [22] lze obvykle regulovat od maximálního možného odběru páry (část musí vždy procházet celým soustrojím, aby nedocházelo ke kavitaci [22]) až po odběr nulový, kdy turbína přechází do čistého kondenzačního režimu a chová se v podstatě stejně jako protitlaková. Konstruktivní rozdíly mezi protitlakovou a parní odběrovou turbínou jsou znázorněny na Obr. 2.3. Parní odběrová turbína bývá také označována jako „kondenzační odběrová turbína“, zkráceně KOT.



*Obr. 2.3 Řez protitlakovou turbínou (vlevo) a parní odběrovou turbínou, převzato z [22]*

## 2.2. Centrální zásobování teplem

Možnost centrálního zásobování teplem je naprosto klíčová pro výstavbu ZEVO jako zdroje tepla a elektřiny. Uplatňuje se však v podstatě u všech možných zdrojů tepla bez ohledu na to, zda se jedná o ZEVO, konvenční teplárny, odpadní teplo z průmyslových zařízení [23], nebo v poslední době i například geotermální energii [24]. Kromě toho CZT umožňuje i KVET, jelikož jednou z hlavních podmínek [22] pro uplatnění právě KVET je dostatečný odběr tepla v dané lokalitě. Centrálně dodávaná tepelná energie pak může sloužit ke třem [22] základním účelům: k průmyslovému (technologickému) využití, vytápění a k ohřevu teplé užitkové vody (zkráceně TUV). Nejvýznamnějším faktorem je pak otop. Proto je poptávka po teple v rámci CZT velmi závislá na počasí, respektive na ročním období. V dalších částech této kapitoly bude tedy věnován prostor především otopu a systému ohřevu TUV, který se často provozuje společně s otopem.

Z hlediska technického řešení lze každou síť CZT rozdělit na dvě části – primární a sekundární. Primární sítě vedou teplo od výrobce, sekundární sítě pak vedou tepelnou energii přímo ke konečnému spotřebiteli. Z hlediska této práce jsou tedy důležité především primární sítě. Obecně existují dvě řešení primárních sítí [21], tedy těch, které vedou teplo mezi teplárnou a výměňkovou stanicí. Jedná se o sítě [21] [25] parní a vodní, které se dále dělí na horkovodní a teplovodní. Ve všech případech je teponosným médiem chemicky upravená voda. Jejich základní vlastnosti jsou popsány níže.

### Parní sítě

Teponosné médium představuje voda v plynném skupenství, tedy pára. Běžně bývá [25] o teplotě v rozmezí 180–240 °C a tlaku 0,8–2,4 MPa. Pára může být ze SCZT odebírána přímo a dále využívána například pro technologické účely, nebo může být dopravována „klasicky“ do výměníků, potažmo výměňkových stanic. Proudění páry zajišťuje její tlaková energie. Cirkulaci ve vratném potrubí, ve kterém proudí kondenzát, obstarávají čerpadla nebo vlastní tlak, či samospád. Parní potrubí je charakteristické větší světlostí než vodní. To má za následek esteticky nepříliš pohledné teplovody. V aglomeracích mohou být parovody často sváděny do tzv. podzemních „kolektorů“. Při proudění v parní větvi vzniká na stěnách potrubí kondenzát, který musí být postupně odváděn do kondenzačního



potrubí. Zejména pokud není zajištěna nepřetržitá cirkulace páry, mají tyto rozvody vyšší teplotní ztráty [21]. Z tohoto důvodu jsou v dnešní době postupně nahrazovány teplo / horko vodními sítěmi. Z hlediska technického řešení je při návrhu ZEVO, respektive teplárny obecně, potřeba zajistit, aby byla pára dodávána do sítě o potřebných parametrech. Samotná dodávka může být tedy realizována například přímo, kdy je část páry vedena místo na turbínu do sítě, nebo při odběru z KOT.

### **Horkovodní**

Obvykle slouží jako tzv. primární sítě, tedy jako ty sítě, které dopravují teplo od výrobce k výměňkové stanici [21]. Voda je v nich dopravována při teplotách 110–160 °C a tlacích 1,6–2,5 MPa [25]. Ve vratném potrubí proudí voda o teplotě zpravidla okolo 60 °C. Cirkulaci obvykle obstarávají oběžná čerpadla, umístěná u výrobce tepelné energie. Výhodou těchto sítí je menší tepelná ztráta a nižší světlost trubek, což usnadňuje umístění teplovodů v aglomeracích. I horkovodní trubky mohou být samozřejmě sváděny ve městech do „kolektorů“. Dodávky tepla do takovýchto sítí, stejně jako u teplovodních popsaných níže, mohou být realizovány pomocí páry odebrané z KOT, případně páry která prošla PT. Je zde však nutné zařadit výměník tepla.

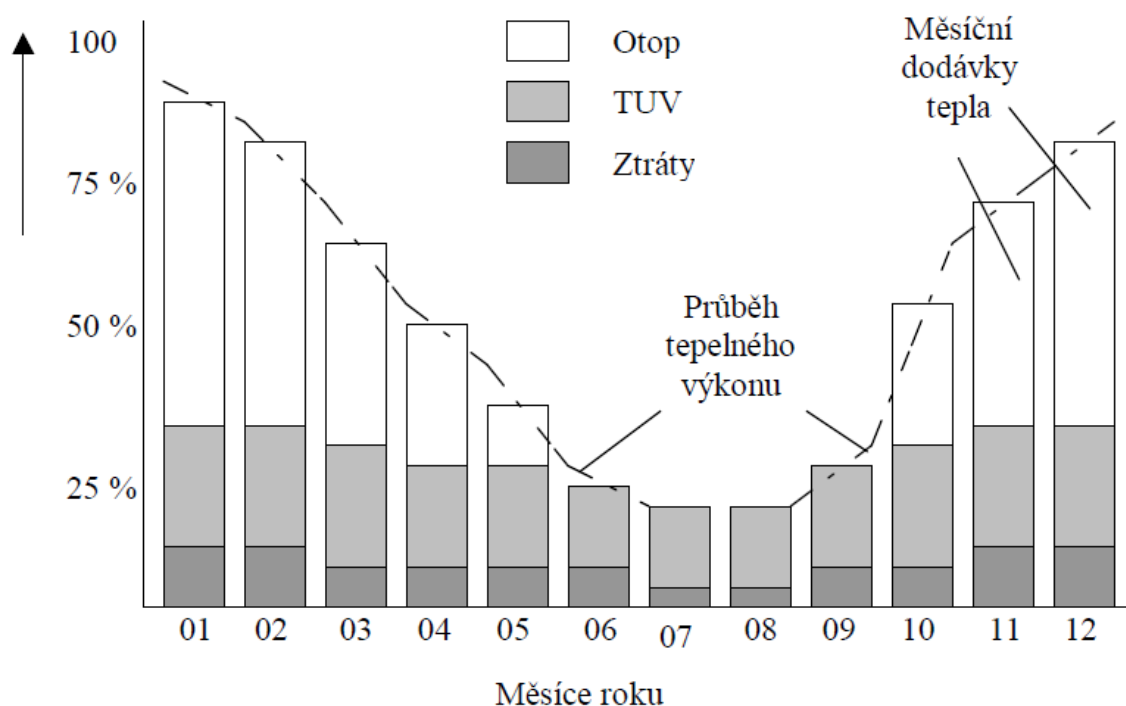
### **Teplovodní**

Fungují na podobném principu jako horkovodní, pouze s tím rozdílem, že parametry dopravovaného média jsou nižší – teploty max. do 110 °C a tlaky do 1,6 MPa [25]. Pokud jsou takovéto sítě napájeny z primárního okruhu, může se jednat o tzv. „sekundární sítě“ [25], které byly zmíněny výše.

## 2.3. Poptávka po teple v rámci CZT

Poptávka po teple je v kontextu SCZT velmi významná. SCZT slouží jako distribuční prostředek k uspokojení právě této poptávky. Jak bylo zmíněno výše, poptávka po teple je složena především z poptávky po otopu a TUV (v běžných případech, kdy neexistuje průmyslový odběr) [21]. Vzhledem k charakteru počasí v ČR je topná sezóna obvykle od září do května. Měsíce s nižší poptávkou lze využít v konvenčních zdrojích tepla například k provádění technologických odstávek z důvodu údržby. Typický diagram průběhu poptávky lze vidět na Obr. 2.4.

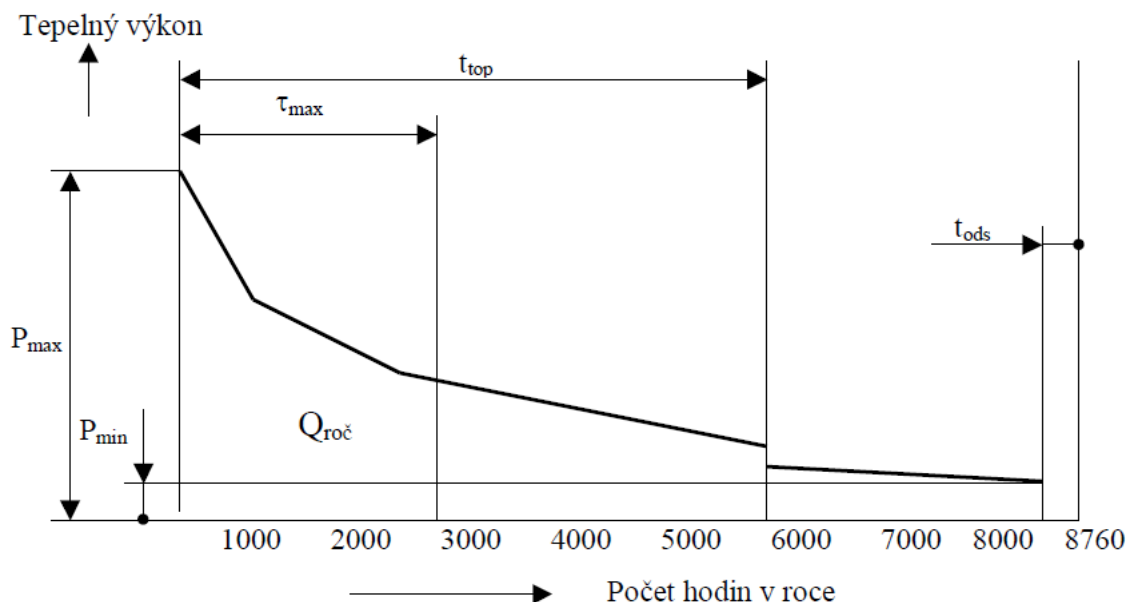
Tepelný výkon  
(dodávka tepla)



Obr. 2.4 Typická poptávka po teple, převzato z [22]

Poptávka po teple může být vyjádřena buď na měsíční, denní nebo hodinové bázi. Čím delší je časový úsek, tím méně vypovídající hodnoty poptávky jsou. V reálné poptávce se totiž vyskytují tzv. „fluktuace“, tedy výkyvy, na které je potřeba z hlediska zdrojů tepla reagovat. Z hlediska integrace ZEVO do SCZT mohou právě fluktuace silně ovlivnit ekonomiku provozu [26], především pokud je při prvotním odhadu počítáno s poptávkou na měsíční bázi. Způsobům, jak zlepšit predikci ekonomické rentability ZEVO s použitím poptávky na měsíční bázi, se autor této práce věnoval například ve své bakalářské práci [27].

Obecně lze s použitím poptávky po teple ve smyslu potřebného tepelného výkonu vyjádřit základní vlastnosti teplárenských sítí [22]. Diagram, označovaný také jako „diagram potřeb energie/tepla“, na kterém je vyobrazen potřebný tepelný výkon pro uspokojení poptávky v závislosti na čase, po který je během roku tento výkon potřeba vyvíjet, je zobrazen na Obr. 2.5. Jednotlivé koeficienty jsou vysvětleny níže.



Obr. 2.5 Typické ukazatele teplárenských soustav, převzato z [22]

Legenda k Obr. 2.5 [22]:

- „ $Q_{roč}$  - roční celková dodávka tepla do SCZT (tvoří ji dodávka tepla pro otop, pro přípravu TUV, pro krytí ztrát v rozvodech a případně i pro technologické účely)
- $P_{max}$  - maximální výkonové zatížení teplárenské soustavy (zpravidla nastává při nejchladnějších pracovních dnech v roce v době ranních odběrových špiček)
- $P_{min}$  - minimální výkonové zatížení teplárenské soustavy (nastává v letním období, zpravidla ve volných dnech a v době dovolených v nočních hodinách)
- $t_{max}$  - doba využití maximálního tepelného výkonu (udává dobu, za kterou by byla realizována celková roční dodávka tepla  $Q_{roč}$  při max. zatížení teplárenské soustavy  $P_{max}$ )
- $t_{top}$  - doba trvání topné sezóny (tj. doba, po kterou je v zásobovaných objektech teplo využíváno pro otop)
- $t_{ods}$  - doba odstávky v letním období (tj. doba, po kterou jsou dodávky tepla přerušeny z důvodu plánovaných oprav, nebo revizí zařízení).“

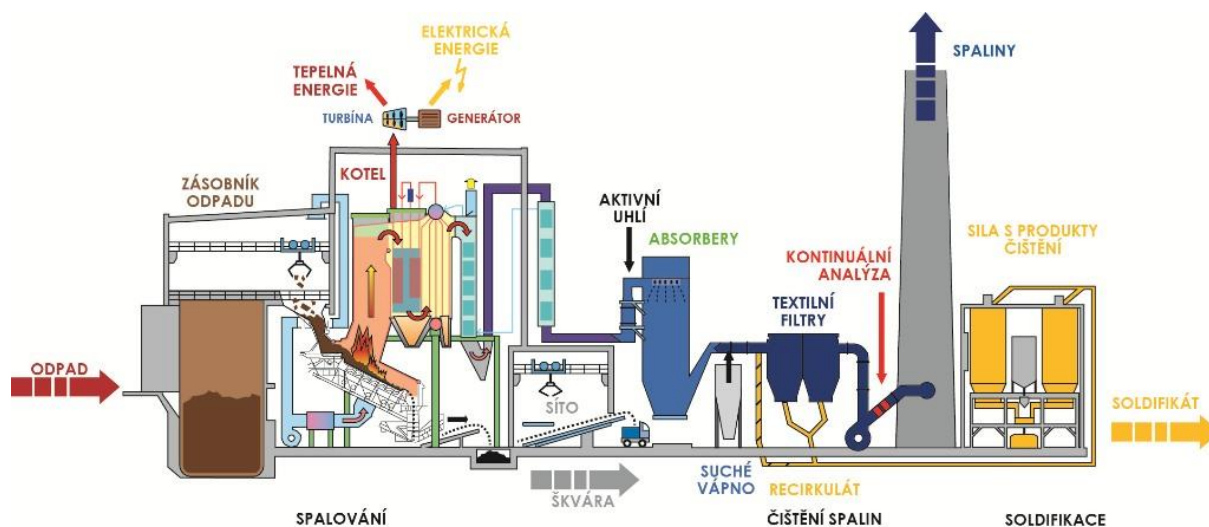
### 3. Zařízení pro energetické využití odpadu

Tato kapitola je věnována popisu ZEVO z hlediska problematiky provozní, legislativní a ekonomické.

#### 3.1. Popis činnosti

ZEVO je z pohledu této práce bráno v podstatě jako konvenční teplárna, kde je však místo fosilního paliva, jako je černé či hnědé uhlí nebo zemní plyn, použit odpad. To s sebou samozřejmě nese určitá technologická specifika. Technologický proces v rámci ZEVO je ilustrován na příkladu ZEVO v Brně, zobrazeného na Obr. 3.1 [8]. Schéma se sice týká konkrétního ZEVO, lze na něm však demonstrovat základní principy většiny zařízení, ve kterých je také využíván teplárenský princip (KVET).

Odpad je skladován v bunkru či zásobníku, kde dochází také k jeho mechanické homogenizaci [28], což je proces, při kterém je odpad nejen promícháván, ale také rozemílán na menší části. Tím je napomáháno stabilnější výhřevnosti. Z bunkru je odpad



Obr. 3.1 Schéma ZEVO v Brně, převzato z [8]

dopravován do oblasti ohniště, kde dochází k jeho spalování. Všechny ZEVO postavené v ČR mají tzv. „roštové ohniště“ [28]. V oblasti ohniště jsou umístěny také hořáky na zemní plyn, které slouží především při nájedu ohniště – odpad jako palivo je poté schopen hořet samostatně. Vyhořelý odpad, který se takto biologicky stabilizuje, je odváděn jako tzv. škvára. Dochází k velké redukci objemu odpadu, některé zdroje [8] dokonce udávají až o 90 %. Vzniklá škvára může být dále využívána, například k technologickému zabezpečení skládek (více viz. podkapitola 1.2.1). Před využitím se ještě z biologicky inertní škváry získávají pomocí elektromagnetu i kovy, jejichž prodej slouží jako další složka zisku ZEVO.

V prostoru nad ohništěm je umístěn kotel, ve kterém je stupňovitě generována přehřátá pára. Pára je poté vedena na turbínu (více o používaných turbínách v podkapitole 2.1.2).

Z turbíny je pak pára odváděna do tepelného výměníku, kde se předává tepelná energie, která je dále prodávána do SCZT. Malá část vody se může „ztratit“ v podobě odluhu, který je dále v čištění společně s odpadní vodou, která vzniká při „mokrém“ praní spalin.

Z pohledu procesního inženýrství je velmi zajímavá problematika čištění spalin. Jedná se o komplexní a relativně komplikovaný problém, jehož řešení však není předmětem této práce. Zde pouze postačí zmínit, že čištění spalin se skládá z několika typických kroků či stupňů. Popis stupňů je čerpán ze zdrojů [8] a [28]. Jedná se o popis procesu použitého v SAKO Brno. Tento proces slouží jako modelový příklad obtížnosti čištění spalin v rámci typického ZEVO.

Nejprve je ve vhodné oblasti nad ohništěm do spalin dávkován dusík ve formě roztoku čpavku či močoviny, což přispívá ke snížení emisí oxidů dusíku (ty obvykle souhrnně označovány jako NO<sub>x</sub>). Dále dochází k průchodu adsorbčními reaktory, ve kterých probíhá *„adsorbce těžkých kovů a perzistentních organických polutantů typu PCDD/F, PCB a PAU“*. Poté spaliny prochází rozprašovači vápenné suspenze a jsou čištěny v absorbérech. V případě zvýšené koncentrace kyselých složek spalin dochází ke spuštění suché vápenné metody, tedy přidání hašeného vápna do proudu spalin. Posledním krokem je mechanické čištění, kdy proud spalin prochází přes textilní filtry, ve kterých dochází k zachycení převážného množství tuhých, mechanických znečišťujících látek. Spaliny jsou dále pouštěny do komína, kde může docházet ještě k průchodu elektromagnetickým filtrem. Z komína jsou vyčištěné spaliny vypouštěny do ovzduší.

Vedlejším produktem čištění spalin je především popílek, který je dle platné legislativy [13] považován za nebezpečný odpad s označením 10 01 16. Jako s takovým s ním tedy musí být i nakládáno.

## 3.2. Omezení výstavby a provozu

Výstavba ZEVO představuje poměrně velký projekt, ať již z hlediska stavebního, technologického, nebo investičního. Aby vůbec mohlo k samotné stavbě či následnému provozu dojít, musí být splněna celá řada požadavků, například ze strany legislativy, nebo z pohledu očekávání investora.

### 3.2.1. Emisní limity

Každé ZEVO má legislativou [16] dané maximální možné znečištění, které může vypustit s každým m<sup>3</sup> spalin. Tyto hodnoty je dobré nejen znát, ale položit také do kontextu emisních limitů, platných pro jiné stacionární zdroje znečištění, které mají podobnou funkci – tedy kotle na konvenční pevná či plynná fosilní paliva. Emisní limity pro vybrané látky (oxid siřičitý, oxidy dusíku, tuhé znečišťující látky a oxid uhelnatý), skrze které bude ZEVO porovnáváno s konvenčními zdroji, jsou uvedeny v tabulce 3.

Zneč. látka	Max. limit [mg/m <sup>3</sup> ]						
	Ref. Kys. 11%	Ref. Kys. 3%			Ref. Kys. 6%		
	ZEVO	ZP 50	ZP 100	ZP 300	PP 50	PP 100	PP 300
SO <sub>2</sub>	50	0	35	35	400	400	200
NO <sub>x</sub>	200	100	100	100	300	300	200
TZL	10	0	5	5	20	250	20
CO	50	50	100	100	300	250	250

Tabulka 3 Emisní limity pro ZEVO, zemní plyn (ZP) a pevná paliva (PP) [16] Pozn.: Hodnoty s číselným označením 50 platí pro zdroje o příkonu 5–50 MW, 100 odpovídají 50–100 MW a 300 pak 100–300 MW.

Hodnoty uvedené v tabulce odpovídají zařízením, která byla uvedena do provozu po 28. prosinci 2004. Hodnoty pro konvenční zdroje jsou odstupňovány dle příkonu vyvíjeného při spalování paliva. Dále se pak liší od limitů pro ZEVO referenčním obsahem kyslíku ve spalínách. Pro objektivní srovnání se ZEVO je tedy nutné provést dva přepočty.

První přepočet se týká ZEVO z hlediska příkonu na základě kapacity ročně zpracovaného odpadu. To umožní přehlednější zařazení emisních limitů pro jmenovité kapacity v kontextu konvenčních zdrojů. Dle [17] je minimální výhřevnost odpadů, které můžeme uvažovat pro EVO, 6,5 MJ/kg. Na základě ústní konzultace je však hodnota výhřevnosti odpadu, reprezentovaného SKO, brána jako 10 MJ/kg. Vzhledem k tomu, že některé zdroje [29] uvádějí tuto výhřevnost ještě vyšší, jeví se tento odhad v pořádku. Dále je potřeba odhadnout dobu provozu, která je stanovena na 8088 hodin za rok. Tato hodnota doby provozu, odpovídající 337 dnům, je uvažována i v rámci optimalizačního modelu HCCP (více o tomto modelu pojednává podkapitola 4.2).

Druhým kritériem, které zajistí co největší objektivitu srovnání, je přepočet na stejné stavové podmínky. Emisní limity pro ZEVO jsou dle části I. přílohy č. 4 k [16] vztaženy k suchému plynu při referenčním obsahu kyslíku 11 %. Emisní limity pro konvenční zdroje jsou dle stejného legislativního dokumentu vztaženy taktéž k suchému plynu, avšak k referenčnímu obsahu kyslíku 6 % pro pevná paliva (tedy černé a hnědé uhlí) a 3 % pro paliva plynná.

Nejprve je tedy potřeba zařadit ZEVO dle kapacity k příslušným příkonům, vyjádřeným pomocí roční spotřeby paliva – odpadu. Vyjádření je provedeno dle rovnice:

$$P_t = \frac{C \cdot LVH_{\text{odpad}} \cdot 10^6}{t_{\text{provoz}} \cdot 3600} \rightarrow C = \frac{P_t \cdot t_{\text{provoz}} \cdot 3600}{LVH_{\text{odpad}} \cdot 10^6} \left[ \frac{\text{kt}}{\text{rok}} \right] \quad (3)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

$P_t$	.....	Příkon [MW]
$C$	.....	Kapacita ZEVO [kt/rok]
$LVH_{\text{odpad}}$	.....	Výhřevnost odpadu [MJ/kg]
$t_{\text{provoz}}$	.....	Provozní doba [h]

Příkonu 1 MW tedy odpovídá kapacita:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 8088 \cdot 3600}{10 \cdot 10^6} \doteq 2,91 \left[ \frac{kt}{rok} \right] \quad (4)$$

Příkonu 5 MW:

$$C_5 = \frac{5 \cdot 8088 \cdot 3600}{10 \cdot 10^6} \doteq 14,56 \left[ \frac{kt}{rok} \right] \quad (5)$$

Příkonu 50 MW:

$$C_{50} = \frac{50 \cdot 8088 \cdot 3600}{10 \cdot 10^6} \doteq 145,58 \left[ \frac{kt}{rok} \right] \quad (6)$$

Příkonu 100 MW:

$$C_{100} = \frac{100 \cdot 8088 \cdot 3600}{10 \cdot 10^6} \doteq 291,17 \left[ \frac{kt}{rok} \right] \quad (7)$$

A konečně příkonu 300 MW:

$$C_{300} = \frac{300 \cdot 8088 \cdot 3600}{10 \cdot 10^6} \doteq 873,50 \left[ \frac{kt}{rok} \right] \quad (8)$$

Vzhledem k tomu, že hodnota výhřevnosti odpadu není dána naprosto přesně, jedná se spíše o orientační kapacity. Dá se však konstatovat, že existující zařízení v ČR [11] odpovídají emisním limitům pro konvenční stacionární zdroje o výkonostních rozsazích 5–50 MW, 50–100 MW a 100–300 MW.

Přepoččet na jiné referenční podmínky kyslíku vychází ze vzorce uvedeného v [16]. Je prováděn dle následující rovnice:

$$x_{ref2} = x_{ref1} \cdot \frac{0,21 - x_2^{O_2}}{0,21 - x_1^{O_2}} \quad (9)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

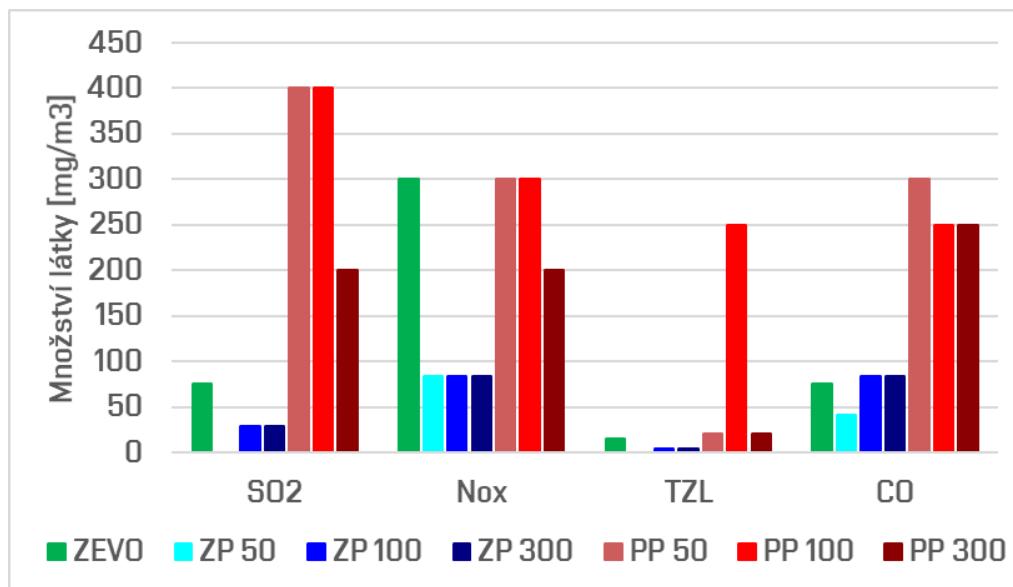
$x_{ref1}$	.....	Koncentrace při stavu ref. kys. 1 [mg/m <sup>3</sup> ]
$x_{ref2}$	.....	Koncentrace při stavu ref. kys. 2 [mg/m <sup>3</sup> ]
$x_1^{O_2}$	.....	Koncentrace kyslíku při stavu 1 [-]
$x_2^{O_2}$	.....	Koncentrace kyslíku při stavu 2 [-]

Přepoččet emisních limitů byl proveden pro ZEVO a stacionární zdroje znečištění, které spalují zemní plyn, na referenční podmínky pro pevná paliva, tedy na referenční obsah kyslíku 6 %. Pro ZEVO nejsou emisní limity odstupňovány dle výkonosti. Emisní limity pro stacionární zdroje spalující zemní plyn pak byla provedena postupně pro všechny výkonostní rozmezí, tedy pro zdroje o příkonu 5-50, 50-100 a 100-300 MW. Emisní limity pro SO<sub>2</sub> a TZL zdrojů spalujících zemní plyn s příkonem do 50 MW nejsou dle legislativy [16] udávány. Emisní limity pro jednotlivé zdroje, přepočtené na stejný referenční obsah kyslíku ve spalínách 6 % jsou zapsány v tabulce 4.

Znečišť. látky	Průměrné denní emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ]						
	ZEVO	Pevná paliva			Zemní plyn		
		5-50 MW	50-100 MW	100-300 MW	5-50 MW	50-100 MW	100-300 MW
SO <sub>2</sub>	75	400	400	200	-	29,17	29,17
NO <sub>x</sub>	300	300	300	200	83,33	83,33	83,33
TZL	15	20	250	20	-	4,17	4,17
CO	75	300	250	250	41,7	83,33	83,33

Tabulka 4 Srovnání emisních limitů vybraných zdrojů znečištění při referenčním obsahu kyslíku 6 %

Emisní limity jsou dále pro větší přehlednost zaneseny do histogramu na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Grafické srovnání emisních limitů vybraných zdrojů při referenčním obsahu kyslíku 6 %

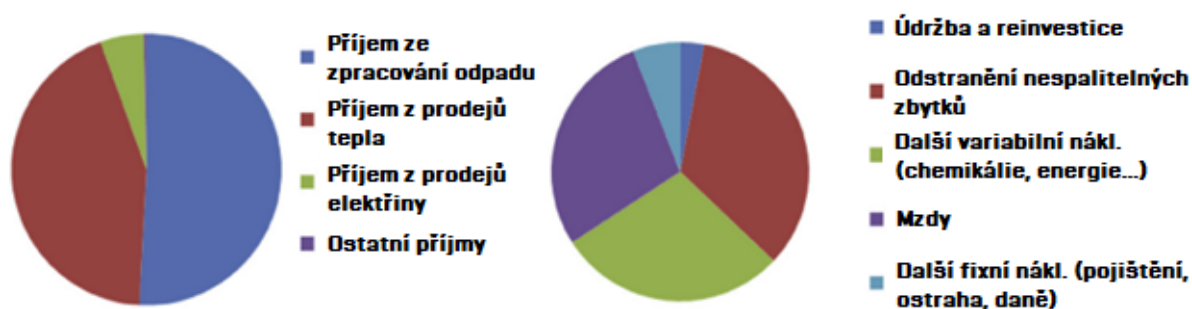
### 3.2.2. Další omezení

Další významná omezení pro výstavbu ZEVO souvisí především s volbou lokality. ZEVO je silně ekonomicky závislé [30] na existenci sítě CZT, jak bude taktéž řečeno v následující podkapitole 3.3. Volba lokality však může být omezena dalšími faktory, ať již technického rázu (nemožnost na napojení na některé inženýrské sítě), nebo jiného charakteru. Z dosavadní praxe ve výstavbě ZEVO v ČR je dle názoru autora této práce také velmi podstatným faktorem souhlas obyvatel, kteří budou stavbou ZEVO přímo dotčeni. Toho lze docílit kupříkladu snižováním negativních vlivů ZEVO na životní prostředí, tedy například vymáháním co nejnižších emisních limitů, kterým byla z tohoto důvodu věnována relativně rozsáhlejší předchozí kapitola. Dále je pak nutné udržovat laickou veřejnost dostatečně informovanou o důvodech, proč je dobré ZEVO stavět, a o reálných nebezpečích, která mohou s provozem ZEVO hrozit.



### 3.3. Ekonomika ZEVO

Ekonomické plánování je samozřejmě z hlediska životaschopnosti ZEVO zcela klíčové. Takovéto zařízení je velmi komplikované a zaměstnává mnoho osob, ať již ve fázi výstavby, nebo ve fázi provozu. Při vytváření ekonomické bilance ZEVO je potřeba uvědomit si, které všechny [30] složky mohou tvořit náklady a které naopak zisky. Na Obr. 3.3 lze vidět v koláčových grafech vyneseny modelový příklad poměrů hlavních nákladů a výnosů



Obr. 3.3 Výnosy (vlevo) a náklady ZEVO, převzato z [30]

spojených s provozem ZEVO. Mezi hlavní náklady při provozu patří:

- Náklady na údržbu
- Náklady na nakládání se zbytkovými produkty (škvára, popílek)
- Náklady na chemikálie
- Mzdy
- Ostatní

Výnosy jsou poté tvořeny těmito složkami (seřazeny dle významu):

- Výnos za zpracování odpadu
- Výnos za prodej tepelné energie
- Výnos z prodeje elektrické energie
- Výnos z prodeje dalších surovin (např. zachycené kovy, prodej škváry pro TZS)

Náklady spojené s provozem ZEVO lze ovlivnit relativně obtížně. Je tedy lepší zaměřit se na maximalizaci výnosů. Jak bylo možné vidět již v grafech na Obr. 3.3, hlavní složkou, která tvoří výnosy, je cena za zpracování odpadu (na obrázku byl uváděn modelový případ, o tomto faktu lze však mluvit obecně [30]).

Cena za zpracování odpadu je závislá na mnoha faktorech, kupříkladu i na vzdálenosti, na jakou je potřeba odpad převážet [30]. K určení vhodných lokalit pro výstavbu ZEVO z hlediska přijatelné ceny za zpracování odpadu lze použít například optimalizační nástroj NERUDA [30], který byl vyvinut na ÚPI. Cena za zpracování odpadu musí být dále v dané lokalitě konkurenceschopná. Toho může být docíleno politikou země, například zaváděním daní za skládkování odpadu.

Jak je dále vidět v grafu na Obr. 3.3, dalším hlavním příjmem ZEVO je prodej tepelné energie. ZEVO je klasickým [23] [1] případem zařízení, které generuje teplo, které může být

dále využíváno. ZEVO je tedy nutné situovat do míst, kde může být napojeno na síť CZT (více o SCZT viz. podkapitola 2.2). Hlavní výhodou ZEVO, které se dále chová jako klasická konvenční teplárna, je pak především „nulová“ cena za palivo. Zatímco konvenční zařízení musí palivo nakupovat, ZEVO za palivo naopak zapláceno dostává.

Další příjmy [30] jsou z hlediska celkové ekonomiky ZEVO méně podstatné. Příjmy za prodej elektřiny přitom tvoří majoritní složku těchto dalších příjmů. Je dobré také zmínit, že ZEVO může být celkově orientováno pouze na výrobu elektřiny. Při té ovšem nedosahuje takových účinností, jako zařízení spalující fosilní paliva. To je zapříčiněno vysokým rizikem vzniku tzv. „vysokoteplotní koroze“ [31] způsobené vysokým obsahem chloru ve spalovaném odpadu (obecně platí pro všechny spalované odpady). Z tohoto důvodu je v ZEVO generována obvykle pára o nižších parametrech. Pokud je to tedy konstrukčně možné, je u ZEVO jednoznačně preferováno využití kogenerace. Princip KVET má jednoznačně pozitivní vliv na ekonomický odhad provozu ZEVO.

## 4. Integrace ZEVO do existující sítě CZT

Jak bylo zmíněno v podkapitole 3.3, provoz ZEVO je značně závislý na existenci sítě centrálního zásobování teplem. V rámci CZT je pak třeba uvažovat provoz ZEVO společně s již existujícími zdroji. K těmto účelům byl v práci použit matematický model HCCP, který je v této kapitole stručně představen.

### 4.1. Metody integrace ZEVO

Lze mluvit o několika [32] možnostech, jak přistupovat k integraci ZEVO do již existující sítě CZT. Z hlediska této práce budou představeny tři způsoby (modelové situace), které jsou popsány níže včetně příslušných ilustrací. Je nutno podotknout, že ilustrace jsou značně zjednodušené a jsou na nich zobrazeny především ty nejpodstatnější veličiny z hlediska koexistence konvenčních zdrojů a ZEVO.

#### Legenda k ilustracím:

Všechny tři ilustrace obsahují prvky šipek, které označují nějaký vstup do systému, či výstup ze systému. Barevné značení šipek je následující:

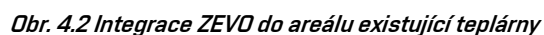
- **Červená** – placený vstup, představuje palivo, za které je potřeba platit a které je potřeba v rámci systému „zhodnotit“
- **Modrá** – představuje vstup energie z paliva získaného pomocí EVO. Takové palivo je v podstatě uvažováno jako s nulovou cenou, což činí ZEVO existence schopným
- **Zelená** – výstupní proud, generuje zisky

#### Integrace ZEVO a plynové kotelny

Představuje v podstatě nejjednodušší problém. Jedná se o zařazení ZEVO do takové sítě, ve které existuje pouze plynová kotelná sloužící jako špičkový zdroj tepelné energie, zkráceně ŠZTE. V tomto případě má provoz ZEVO jednoznačnou prioritu. Je počítáno s tím, že plynová kotelná se chová jako měkký zdroj tepelné energie a je tedy schopná relativně rychlého náběhu. Dále je kotelná schopná dynamicky měnit svůj výkon a pokrývat výkyvy v poptávce po tepelné energii. Integraci ZEVO v rámci takového problému se věnuje například bakalářská práce [27] autora této práce. Schéma problému je zobrazeno na Obr. 4.1.

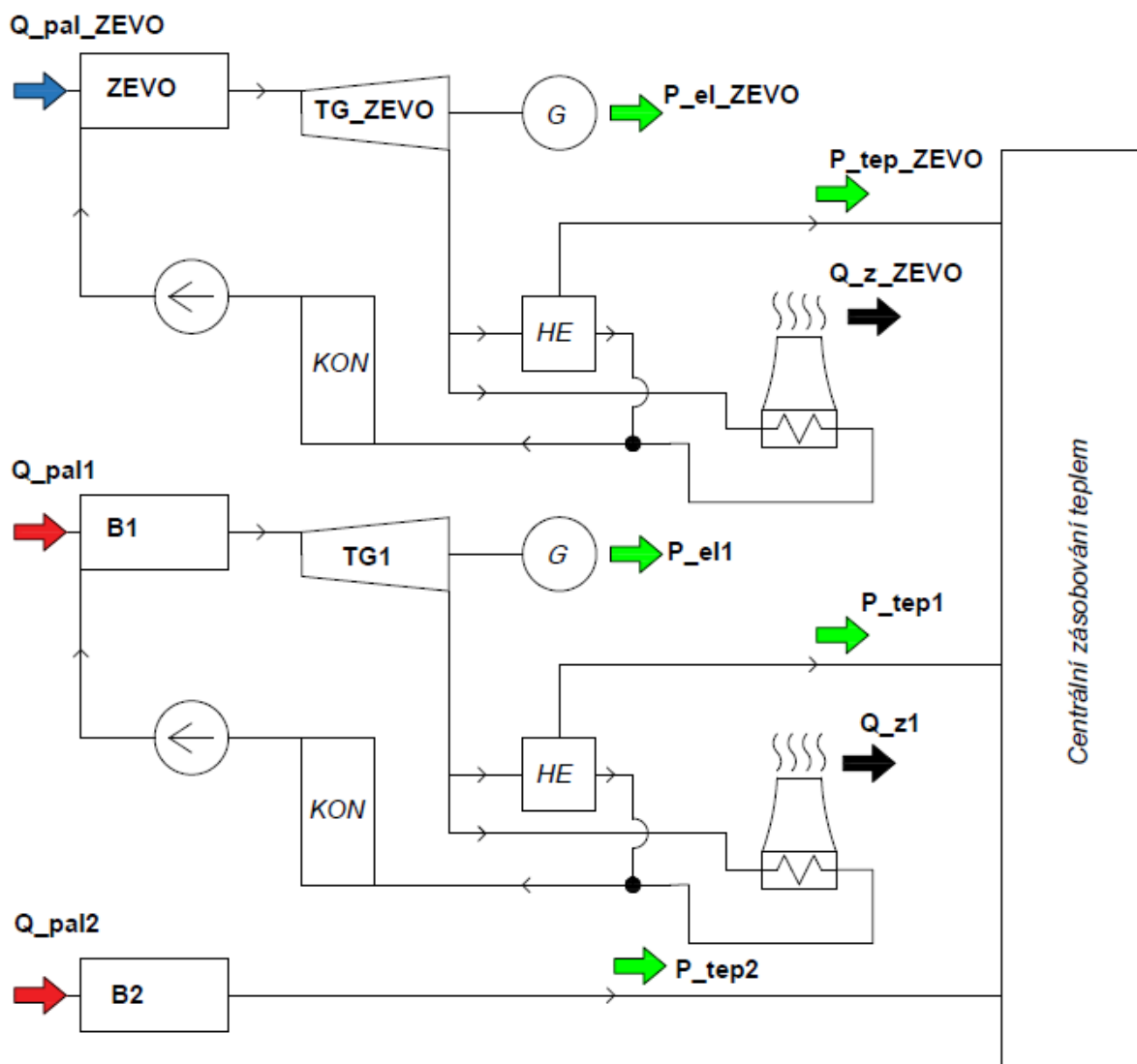


V tomto případě je ZEVO uvažováno vlastně jako přídavný, paralelně zapojený kotel v rámci jedné teplárny. Takovýto případ může představovat problém zejména z toho důvodu, že primární kotel bude mít nějaký minimální výkon a dobu náběhu. I v tomto případě jde samozřejmě uvažovat s existencí ŠZTE. Na rozdíl od třetího, nejkomplikovanějšího případu se u této varianty dají očekávat nižší investiční náklady, protože značná část zařízení je již postavená. Schéma tohoto problému je na Obr. 4.2.



## Integrace ZEVO do komplexní sítě

V tomto nejkomplicovanějším případě je ZEVO uvažováno jako další, paralelně stojící teplárna s vlastní turbínou. Hlavním rozdílem mezi existující teplárnou je pak především fakt, že je u ZEVO uvažována nulová cena za palivo. Tento model je nejkomplicovanější, lze u něho uvažovat více paralelně zapojených tepláren, případně i více ŠZTE. Především pro řešení tohoto problému je na Ústavu procesního inženýrství vyvíjen [33] technologicko-ekonomický model HCCP, jehož funkce je detailněji popsána v podkapitole 4.2. Modelový příklad pro tuto situaci je pak vyobrazen na Obr. 4.3.



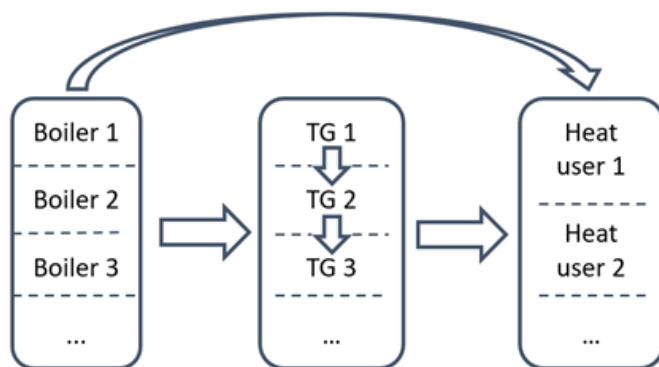
Obr. 4.3 Integrace ZEVO s teplárnou

## 4.2. Technicko-ekonomický model HCCP

Hlavní výpočetní část této práce byla prováděna s použitím optimalizačního modelu HCCP, který byl vyvinut na ÚPI [34]. Vstupy lze do tohoto modelu vkládat skrze uživatelské rozhraní, vytvořené v programu Microsoft Excel. Z toho jsou pak vstupy načteny do optimalizačního nástroje GAMS, který provádí samotný výpočet.

Model lze myšlenkově rozdělit na dvě části [34] [33]. První část umožňuje vkládat jednotlivé scénáře u 4 různých proměnných, které se v ní vyskytují. Jedná se o cenu za MWh elektrické energie, cenu za zpracování tuny odpadu, výhřevnost odpadu a různé scénáře průběhu poptávky po teple. Model také umožňuje vygenerování poptávky po teple na denní bázi, pokud je známa poptávka pouze na bázi měsíční. Denní poptávka po teple je pak rozdělena dle vhodného statistického rozdělení.

Ve druhé části, která je zobrazena na Obr. 4.4, model umožňuje vložení až 8 různých kotlů a 8 různých turbín. U každého kotle je potřeba zadat minimální hodnotu vygenerovaného tepla, cenu za palivo, účinnost, parametry napájecí vody, případně parametry vyráběné páry. Turbíny jsou popsány pomocí lineární závislosti, kdy je uvažován lineární vztah mezi poměrem přiváděné páry ku maximálnímu množství přiváděné páry a výstupního výkonu ku maximálnímu výstupnímu výkonu. U každého kotle je možné zvolit propojení, tedy specifikovat, kam může být veden generovaný výkon. Může se jednat o turbínu, hladinu poptávky po teple, nebo obojí. Stejně tak lze propojit i turbíny a lze tím pádem provést modelování KOT jako dvou samostatných PT, s odběrem páry pro účely SCZT mezi oběma stupni. ZEVO je v modelu uvažováno jako samostatný kotel s nulovými provozními náklady a výkonem, který je úměrný zvolené roční kapacitě zpracovaného odpadu.



Obr. 4.4 Schéma druhé části modelu HCCP, převzato z [34] Pozn.: Boiler = kotel, TG = turbína, Heat user = spotřebitel tepla (SCZT)

Celý vstup je pak řešen jako úloha lineárního programování pomocí již výše zmíněného software GAMS. Jako kritérium při optimalizaci slouží účelová funkce: [34]

$$Z = \sum c_{fuel} + \sum c_{emi} + \sum c_{res} + \sum c_{lim} + \sum c_{oth} - \sum R_{el} \quad [Kč] \quad (10)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

$$\sum c_{fuel} \quad \dots \quad \text{Suma cen paliva pro všechny boilery [Kč]}$$

$\sum c_{emi}$	.....	<i>Suma cen emisních povolenek [Kč]</i>
$\sum c_{res}$	.....	<i>Suma za nakládání s rezidui [Kč]</i>
$\sum c_{lim}$	.....	<i>Suma cen za odsíření [Kč]</i>
$\sum c_{oth}$	.....	<i>Suma ostatních variabilních nákladů [Kč]</i>
$\sum R_{el}$	.....	<i>Souhrnný zisk z prodeje elektřiny [Kč]</i>

Výpočet je proveden dvakrát, nejprve bez ZEVO a dále s integrovaným zařízením. Výsledkem jsou především náklady na výrobu tepla, od kterých již byl odečten zisk způsobený prodejem elektřiny.

Dále je modelován provoz kotlů a turbín tak, aby byla vždy pokryta poptávka po teple. V modelu je použito mnoho zjednodušení, například není uvažována minimální doba náběhu kotlů. Všechny kotle jsou tedy, pokud je u nich v rámci modelu povoleno vypínání, modelovány jako měkké ŠZTE. Jak vypadá typický roční průběh výkonu kotlů pro pokrytí poptávky po teple je demonstrováno v závěru podkapitoly 6.3 na Obr. 6.21.

Pro každou lokalitu musí být model speciálně přizpůsoben. Práce s modelem potom předpokládá určitou úroveň uživatelské znalosti problematiky.

## 5. Popis uvažovaných lokalit

V rámci této diplomové práce byly zkoumány hlavní faktory ovlivňující využitelnost energie vyrobené pomocí EVO. K tomu byly použity dvě případové studie, provedené autorem práce na konkrétních lokalitách označených dle jmen svých příslušných existujících energetických zařízení jako Dětmárovice a Mělník I. Následující kapitola bude zaměřená na detailní popis technologie výroby tepelné energie v uvažovaných lokalitách. Kromě popisu konkrétní lokality z hlediska geografického se jedná především o technické specifikace kotlů, turbín a systémů pro výměnu tepla, popřípadě generování elektrické energie.

### 5.1. Elektrárna Dětmárovice

Technicky se jedná o teplárnu, jak bylo popsáno v kapitole 2.1, s primárním zaměřením na výrobu elektřiny. Zařízení se nachází ve Slezsku, na pomezí České republiky a Polska, cca 15 km od Ostravy a necelých 10 km od Karviné. Vysoká hustota obyvatelstva v okolí je tedy příslibem velkého množství odběratelů tepelné energie, a tedy dobrého potenciálu pro výstavbu ZEVO. Elektrárna byla vybudována mezi roky 1971–1976 [35]. Aktuálně se jedná o největší elektrárnu v České republice, která používá jako palivo černé uhlí. V současné době se navíc neuvažuje s dlouhodobým provozem všech bloků [36], nejméně dva bloky se pak budou jistě odstavovat. To znamená další potenciál pro výstavbu ZEVO.

#### 5.1.1. Technologické řešení

Jak již bylo zmíněno, elektrárna spaluje černé uhlí. U toho je uvažována výhřevnost 22 MJ/kg [35]. O výrobu energie se primárně starají 4 bloky, tvořené 54 m vysokými kotli a třístupňovými odběrovými turbínami. Každý kotel spálí denně cca 1600 tun [35] černého uhlí. Jak již bylo zmíněno, dělá to z tohoto zařízení největší elektrárnu na černé uhlí v České republice. Uhlí je rozemleto na velmi drobnou frakci, která je následně spalována s účinností okolo 90 % [35], maximální teplota v kotli přitom nepřekročí 1400 °C. K nájezdu kotlů do provozních podmínek slouží zemní plyn, doba nájezdu se pak pohybuje okolo 5,5 hodin.

Použité technologie a jednotlivé detaily základních procesních uzlů jsou pak viditelné u vodního cyklu. Ten je ve své plné podobě zobrazen na Obr. 5.2 [37]. Voda je shromažďována v kondenzátoru natlakovaném na přetlak cca 0,6 MPa při teplotě 157 °C. To v tomto stavu odpovídá syté kapalině. Z kondenzátoru je voda nasávána do čerpadla, přičemž se její tlak zvýší téměř na 22 MPa. Voda je pak v potřebném množství 620 t/h dávkována přes soustavu tepelných výměníků do kotle. V těchto výměnících se k ohřevu napájecí vody používají části par odvedených z jednotlivých stupňů turbíny. Odběr páry probíhá po průchodu druhým stupněm. Zároveň ale také pára odebíraná v jednotlivých stupních



Pro účely modelu je však schéma příliš složité. Obecně není jednoduché modelovat kondenzační odběrové turbíny [33]. Z tohoto důvodu je celé schéma značně zjednodušeno a jsou uvažovány pouze dvě virtuální, za sebou následující turbíny. Zjednodušené schéma je zobrazeno na Obr. 5.1. V rámci zjednodušení tedy došlo ke sloučení prvního s druhým stupněm. Lineárnímu modelování virtuálních turbín je pak věnována samostatná podkapitola 6.2.2. Více o parních odběrových turbínách jakožto strojích používaných při KVET je uvedeno v podkapitole 2.1.2.

$Q_{CZT} = 140 \text{ MW}$

$\frac{t/h}{\text{MPa}} \mid \frac{kJ/kg}{^{\circ}\text{C}}$

150 | 3398,1  
 16,5 | 537

B

T1

T2

G

$N_{el} = 162,41 \text{ MW}$

K

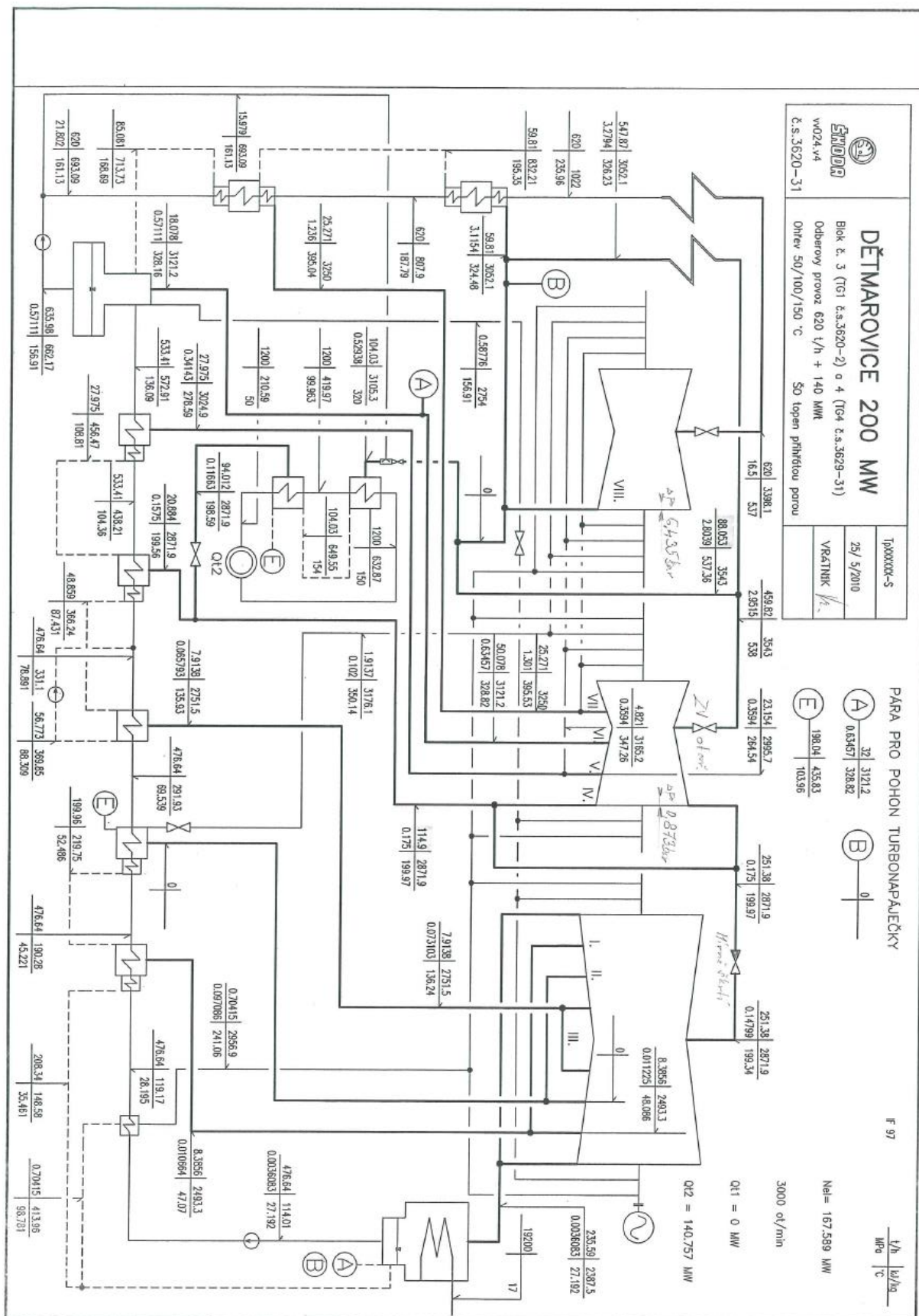
620 | 2872  
 0,14799 | 199,3

620 | 572,91  
 21,8 | 136,09

620 | 693,09  
 21,8 | 161,13

620 | 662,17  
 0,57 | 156,91

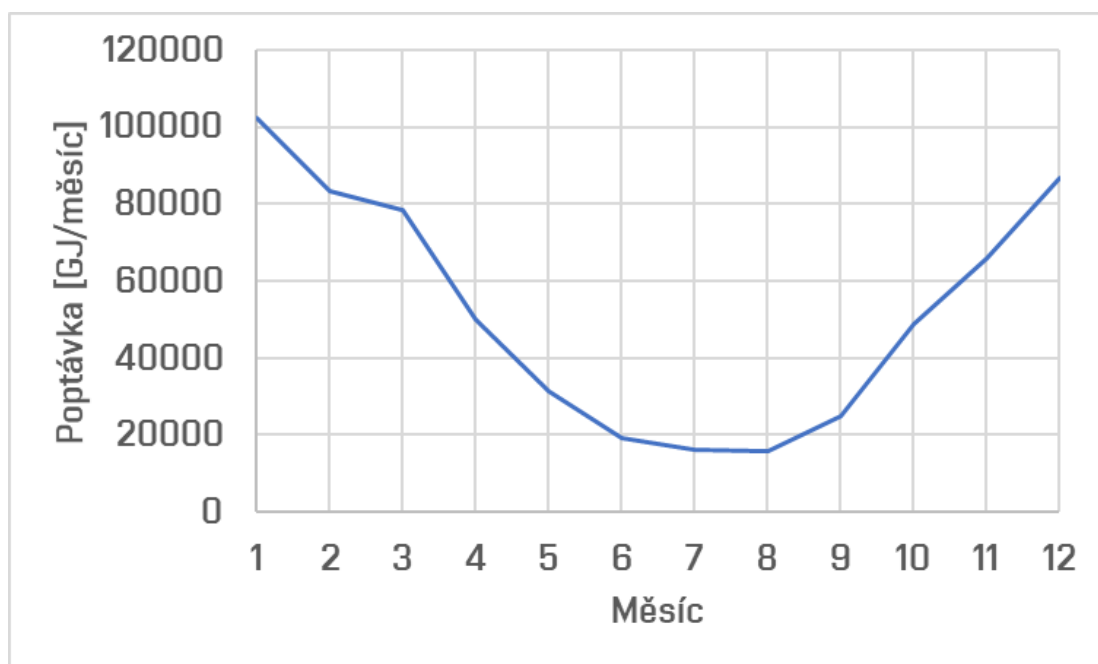
**Obr. 5.1 Zjednodušené schéma Dětmarovice**



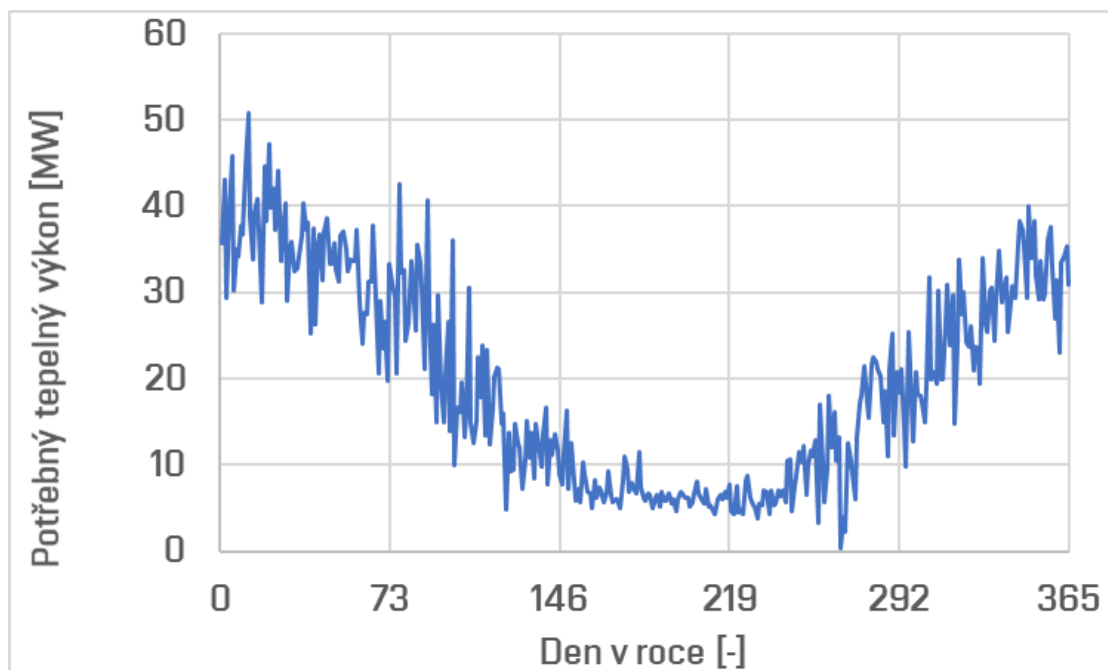
Obr. 5.2 Komplexní schéma Dětmarovice [37]

### 5.1.2. Poptávka po teple

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, poptávka po teple slouží jako hlavní kritérium pro posuzování rentability výstavby ZEVO. Poptávka po teple je získána na měsíční bázi z interní databáze ÚPI [38]. Následně byla pomocí modelu HPPC převedena na poptávku na denní bázi. Jedná se o reálnou poptávku v obcích Bohumín a Orlová. Celková poptávka po teple činí 623,2788 TJ za jeden kalendářní rok.



Obr. 5.4 Dětmárovice - poptávka po teple na měsíční bázi [38]



Obr. 5.3 Dětmárovice – vygenerovaný potřebný tepelný výkon na denní bázi z modelu HPPC

## 5.2. Elektrárna Mělník I

V této krátké kapitole jsou popsány specifikace druhého případu, pomocí kterého byly zkoumány limitující faktory stavby ZEVO. Vzhledem k faktu, že předpřipravený model této lokality byl autorovi poskytnut jako referenční, nejsou zde ani příliš do detailu popsány jednotlivé parametry. I tato označení elektrárna je ve skutečnosti technicky teplárnou, protože zároveň s výrobou elektrické energie dodává i energii tepelnou [39] do relativně blízkého hlavního města ČR – teplo je dopravováno 34 km dlouhým horkovodem. Provoz tohoto zařízení byl zahájen v roce 1960.

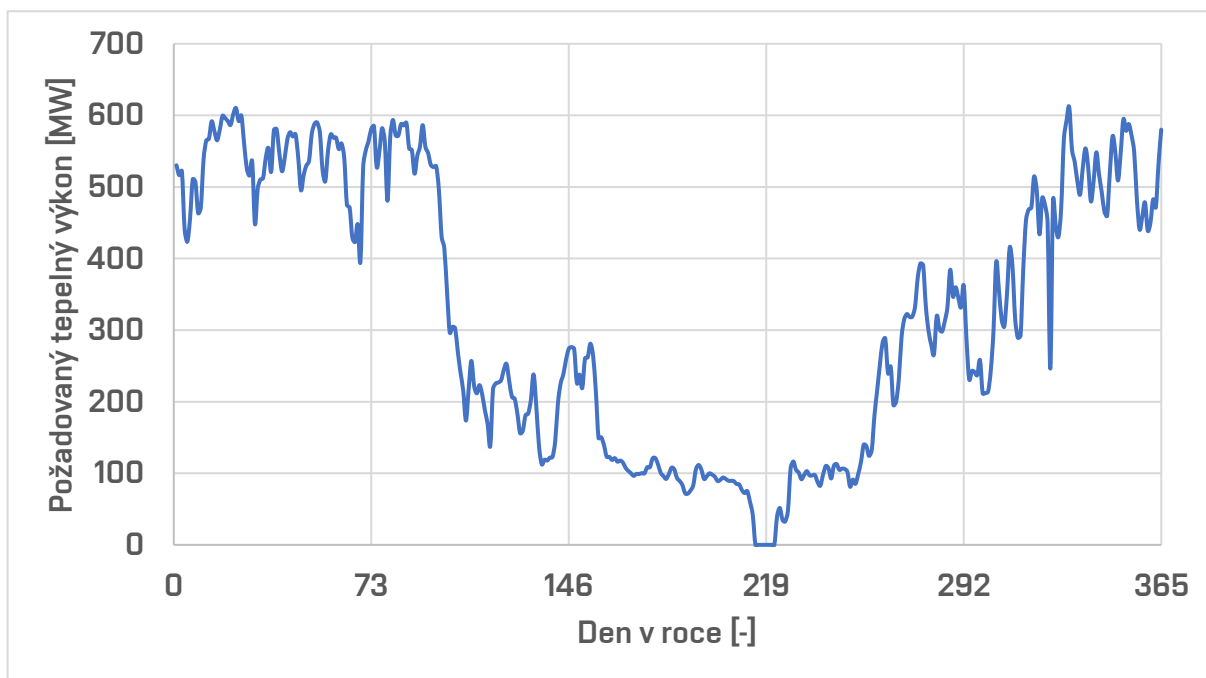
### 5.2.1. Technologické řešení Mělník

I Elektrárna Mělník I spaluje při výrobě energie uhlí, v tomto případě se však jedná o uhlí hnědé. V elektrárně je instalováno 6 granulačních kotlů [39] s parním výkonem 250 t/h. Každý rok je zde spotřebováno okolo 1,4 milionu tun hnědé uhlí. Dále jsou v zařízení instalovány 2 protitlakové a 2 kondenzační odběrové turbíny [39]. Všechny turbíny mají shodný instalovaný výkon 60 MW. Pára je vyráběna při parametrech teploty 1400 °C a tlaku 9,3 MPa.

Teplonosná voda je ohřívána dvoustupňově, nejdříve párou, která prošla protitlakovými turbínami, na teplotu 120 °C. K ohřevu teplonosné vody na 140 °C pak slouží pára odvedená z kondenzačních odběrových turbín [39]. Problematice PT a KOT turbín byla věnována podkapitola 2.1.2 v této práci. V rámci simulačního modelu jsou uvažovány z důvodu zjednodušení pouze 4 kotle. Pára z každého kotle může být vedena na libovolnou turbínu.

### 5.2.2. Poptávka po teple – Mělník

Vzhledem k blízké existenci hlavního města ČR je v této lokalitě velká poptávka po teple. Poptávka, vyjádřená pomocí potřebného tepelného denního výkonu, je vyobrazena na Obr. 5.5. Co se týká poptávky roční, ta se pohybuje okolo 10000 TJ. Oficiální zdroje udávají [39] poptávku 9800 TJ, získaný přednastavený model však uvažoval s určitým modelovým rokem. Teplárna dodává do sítě tepelnou energii celoročně, s výjimkou cca týdenní [39] odstávky v letních měsících.



*Obr. 5.5 Potřebný tepelný výkon - Mělník*

## 6. Technicko-ekonomické modely

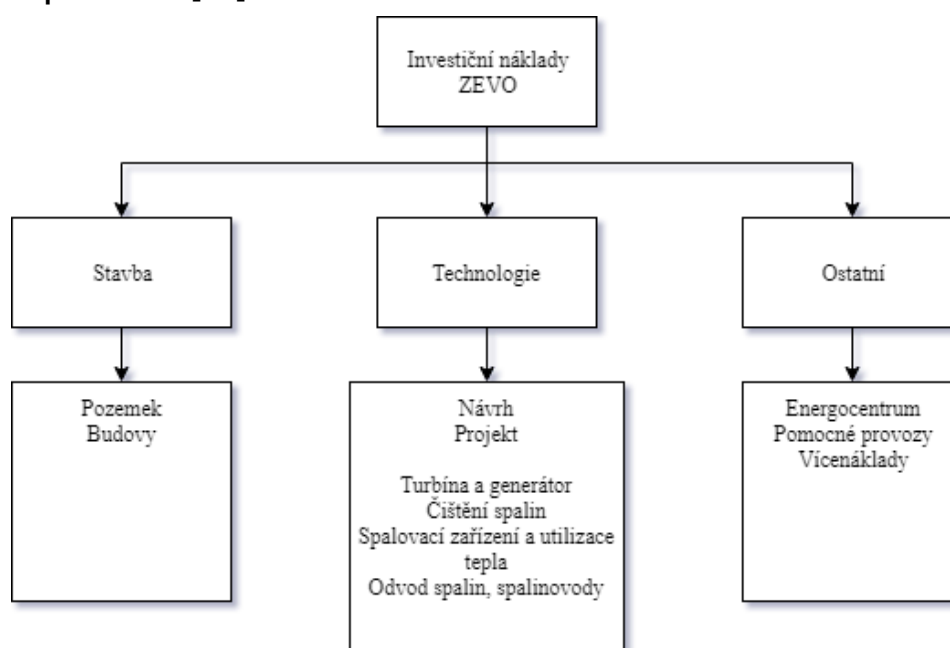
V této kapitole jsou popsána řešení pro modelové lokality, zejména pro lokalitu Dětmárovice. Lokalita Mělník pak slouží pouze pro srovnání, jako větší síť.

### 6.1. Investiční náklady

V této kapitole je stručně popsána metoda výpočtu investičních nákladů spojených s výstavbou nového ZEVO a také s výstavbou případného špičkového zdroje tepelné energie.

#### Investiční náklady ZEVO

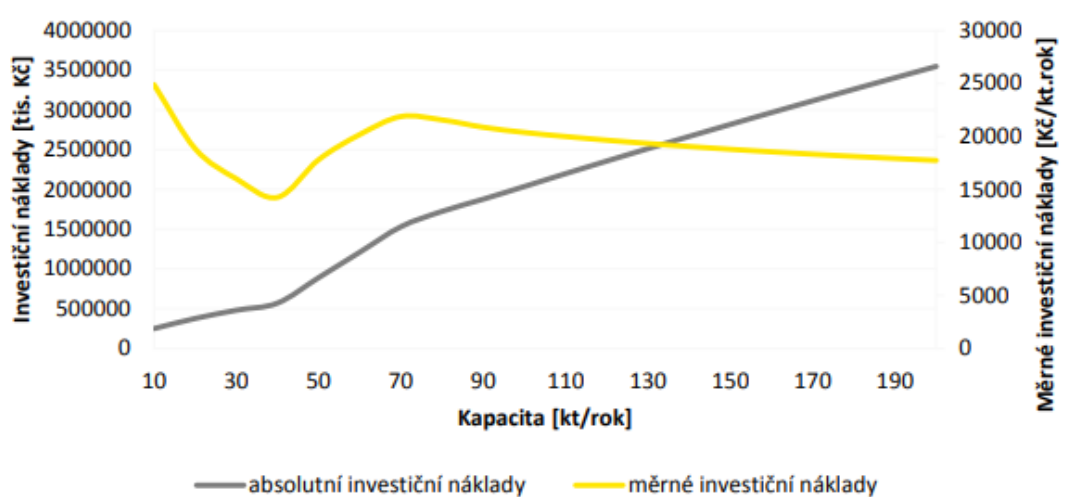
Investiční náklady na výstavbu ZEVO v sobě zahrnují náklady na řadu různých dílčích celků, ze kterých je zařízení složeno. Ty hlavní jsou pak vypsány ve schématu na Obr. 6.1. Údaje jsou převzaty z [40].



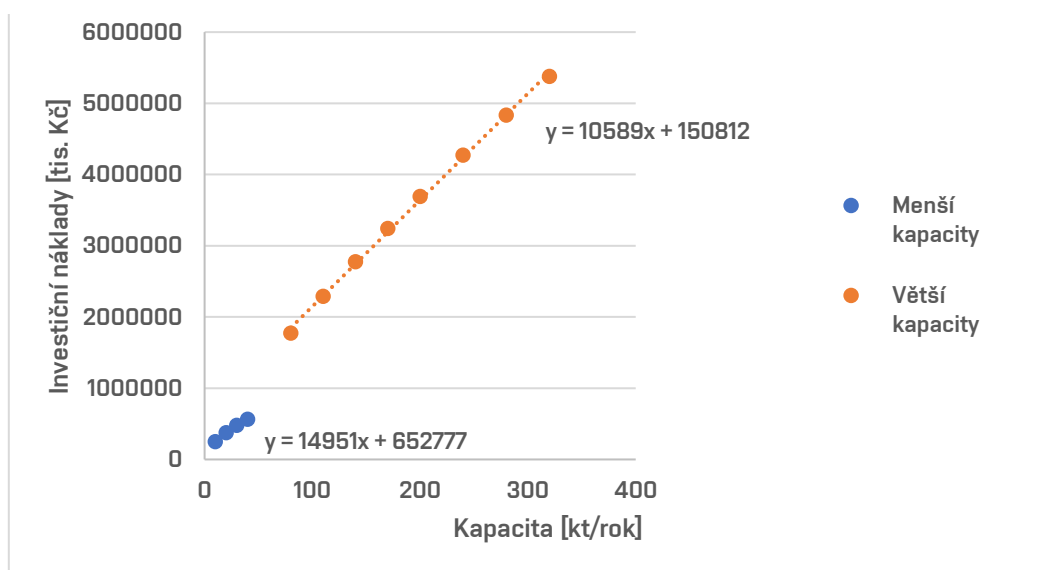
Obr. 6.1 Položky v investičních nákladech na ZEVO

Vyčíslit jednotlivé položky je samozřejmě možné, i když poněkud obtížné. Pro účely této práce však postačí vyčíslit celkové investiční náklady v závislosti na nominální kapacitě zpracovaných odpadů. Jak lze vidět na Obr. 6.2, závislost investičních nákladů na kapacitě je téměř lineární. Byly použity dva lineární regresní modely, pro kapacity do 40 kt/rok a dále pak od 100 kt/rok. U nižších kapacit působí některé faktory [41] (změna měrných finančních nákladů na jednotlivé aparáty), které linearitu narušují. V této práci však budou řešeny především ZEVO malých kapacit, tedy v intervalu 10-40 kt/rok, a pak větších

kapacit, což znamená 100-200 kt/rok. Na základě těchto dat byly tedy vytvořeny regresní lineární funkce, které s dostatečnou přesností zobrazují závislost investičních nákladů na kapacitě ZEVO. Přímo v grafu na Obr. 6.3 lze vidět nejen jasnou linearitu závislosti, ale také již přímo vypsané rovnice regresních přímek.



Obr. 6.2 Investiční náklady ZEVO v závislosti na kapacitě, převzato z [9]



Obr. 6.3 Vyjádření lineární závislosti investičních nákladů na kapacitě ZEVO

Pro ZEVO kapacit 10 – 40 kt se tedy investiční náklady řídí dle rovnice:

$$P_{inv} = 14951 \cdot C + 652777 \quad (11)$$

A pro ZEVO větších kapacit nad 100 kt/rok se investiční náklady vypočítají dle rovnice:

$$P_{inv} = 10589 \cdot C + 150812 \quad (12)$$

Kde „C“ značí roční zpracovanou kapacitu v kt/rok.

## 6.2. Model Dětmárovce

Jak již bylo zmíněno výše, lokalita Dětmárovce slouží jako primární pro modelování ZEVO na konkrétním případě. V kapitole je kromě samotné analýzy popsán i postup, jak byly určeny výchozí výpočetní hodnoty.

### 6.2.1. Cena paliva

Cena za energetickou jednotku tepelné energie je v největší míře ovlivněna právě cenou paliva. Na této položce jde například i demonstrovat ekonomická výhoda ZEVO – zatímco běžná teplárna musí palivo nakupovat, primárním palivem pro ZEVO je SKO, za jehož likvidaci dostává zapláceno, jak bylo již zmíněno v kapitole 3.3. Na druhou stranu jsou však při výstavbě ZEVO vyšší investiční i provozní náklady vzhledem k dosaženému energetickému výkonu.

Pro správné fungování modelu je nutné zadat cenu za palivo v jednotkách Kč/MWh. Ty nejsou většinou přímo dohledatelné, proto je obvykle potřeba přepočítat cenu z běžných jednotek, které jsou udávány například v ceně za kg paliva. Cenu za černé uhlí lze stanovit buď dle dostupného zdroje [42], který uvádí průměrnou cenu pro běžného spotřebitele, nebo pomocí jiného způsobu. Nedá se totiž očekávat, že by byla cena za uloženou energii v palivu stejná i pro tak velký provoz, jako jsou Dětmárovce. Pokud zvolíme první cestu, je cenu za MWh černého uhlí ještě potřeba přepočítat. K tomu použijeme výhřevnost černého uhlí, která byla již zmíněna v podkapitole 5.1.1, a tedy  $LVH = 22 \text{ MJ/kg}$  [35]. Výpočet, je zapsán v rovnici:

$$Price_{\text{čU}} = \frac{[cena] \cdot 3600}{LVH} = \frac{5,5 \cdot 3600}{22} = 900 \text{ Kč/MWh} \quad (13)$$

Druhý způsob určení ceny je pak pomocí porovnání deklarované ceny za palivo, udávané ve výroční zprávě [43], s množstvím vyrobené energie, která je uvedena v téže zprávě. ČEZ ve zprávě z roku 2017 uvádí, že v provozu Dětmárovce bylo utraceno celkově za palivo 1027,2 mil Kč, z čehož 95 % představuje náklady na černé uhlí. Dále je ve zprávě deklarováno množství vyrobené elektrické energie jako 81 % z plánované kapacity 2179 GWh a množství vyprodukovaného tepla jako 628 TJ. Výpočet ceny paliva tímto způsobem je pak proveden v rovnici:

$$Price_{\text{čU}} = \frac{1027,2 \cdot 10^6 \cdot 0,95}{\left(2179 \cdot 10^3 \cdot 0,81 + 628 \cdot \frac{10^3}{3,6}\right)} = 503,16 \text{ Kč/MWh} \quad (14)$$

V tabulce níže jsou pak vypsány uvažované ceny jak za černé uhlí, tak za zemní plyn [42]. Pro účely výpočtu byla nakonec jako výchozí cena za MWh černého uhlí brána hodnota 500 Kč. Je také nutno podotknout, že cena paliva dle 1. způsobu výpočtu se týká spíše běžných malých spotřebitelů, nikoliv velkého provozu, jako je černouhelná elektrárna (resp. teplárna).



Palivo	Cena [Kč]	Za jednotku
Černé uhlí – 1. způsob výpočtu	900	MWh
Černé uhlí – 2. způsob výpočtu	503,16	MWh
Zemní plyn	1279	MWh

Tabulka 5 Srovnání cen paliva - Dětmorovice

## 6.2.2. Parní turbíny

V technologicko-ekonomickém modelu HCCP je výkon parních turbín modelován jako lineárně závislý na průtoku páry. To znamená, že závislost výstupního dodávaného elektrického výkonu, který je samozřejmě důležitý z hlediska ekonomiky provozu, protože vyrobená energie generuje zisk, je brána jako lineární na energii vstupující páry. To je výhodné zejména v kontextu použitého optimalizačního modelu HCCP – je zachována linearita a přitom je zohledněna změna vnitřní termodynamické účinnosti v závislosti na průtoku páry. Pro vymodelování turbín v zařízení Dětmorovice byly použity interní data o jejich provozu. Je nutno taky podotknout, že reálné turbíny jsou kondenzační odběrové se dvěma odběry, což však překračuje limity použitého technického simulačního modelu. Pro účel práce byla tedy každá z turbín virtuálně rozdělena na dvě samostatné protitlakové turbíny s tím, že odběr probíhal po průchodu první turbínou.

Modelování je prováděno dle následující rovnice:

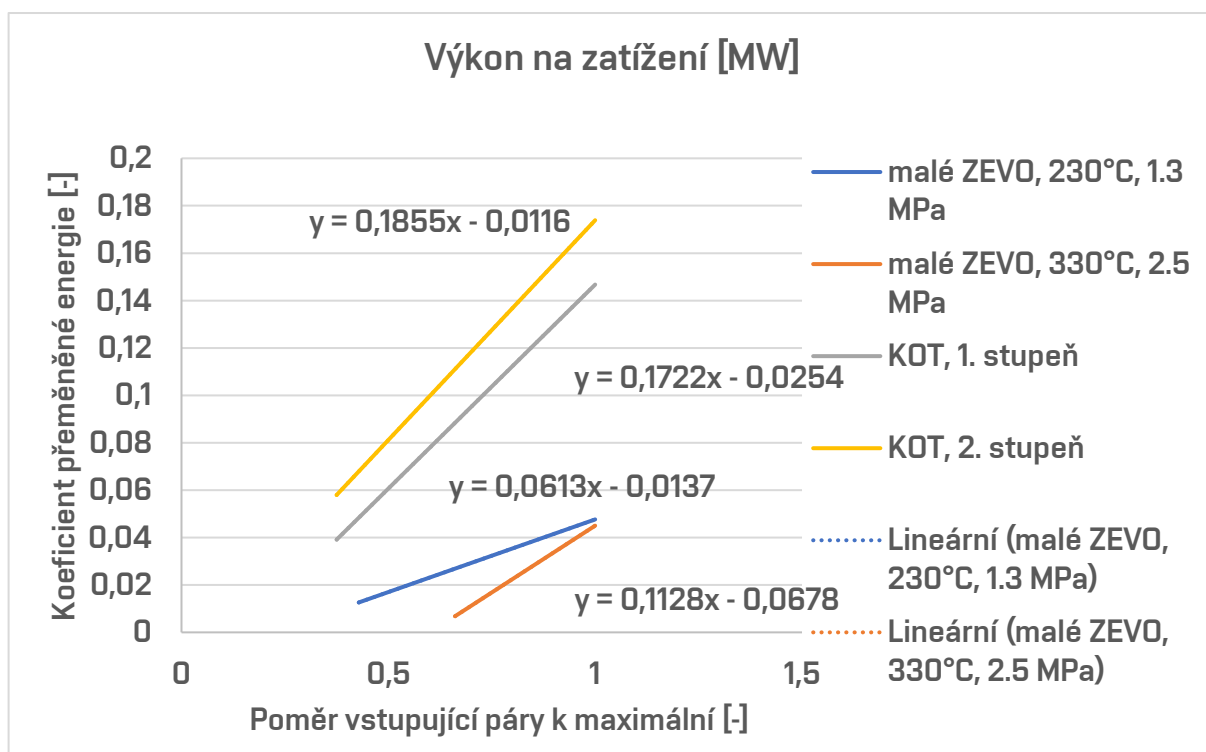
$$P_{out} = a \cdot P_{in} + b \quad (15)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

$P_{out}$	.....	Výstupní výkon [MWh]
$P_{in}$	.....	Vstupní výkon [MWh]
$a, b$	.....	Regresní koeficienty

Bylo tedy potřeba nalézt koeficienty  $a$  a  $b$ . To bylo uskutečněno pomocí modelovacího software W2E [44], který byl vyvinut na Ústavu procesního inženýrství. Vstupy na oba dva stupně turbíny jsou přímo úměrné vstupnímu množství přehřáté páry. Entalpie na vstupu a výstupu obou stupňů odpovídají daným stavovým podmínkám tlaku a teploty. Aby bylo po odběru páry pro CZT, respektive po průchodu páry celou turbínou, dosaženo reálných, dle schématu zařízení daných parametrů teploty a tlaku, byla na prvním stupni uvažována izotermická účinnost 51,8 % a na druhém stupni 75 %. Výstup z tohoto modelu byl použit v dalším modelu, podle kterého byla určena přímo regresní závislost výkonu na průtoku páry. Elektro-mechanická účinnost je pak u obou turbín uvažována jako 98 %.

Získaná data o výkonu byla použita ve druhém modelu, který byl interně vytvořen na Ústavu procesního inženýrství. Tento model přímo modeloval lineární závislost výkonu jednotlivých stupňů kondenzační odběrové turbíny v závislosti na množství vstupní páry (potažmo energie).



Obr. 6.4 Lineární model turbín UPI

Regresní koeficienty, získané pomocí funkcí vypsanych v grafu na Obr. 6.4, jsou pak zapsány v tabulce 4.

Stupeň	Regresní koeficient a [ - ]	Regresní koeficient b [ - ]
1	0,177491201	-15,32997275
2	0,164089623	-4,916158712

Tabulka 6 Regresní koeficienty parních turbín v zařízení Dětmorovice

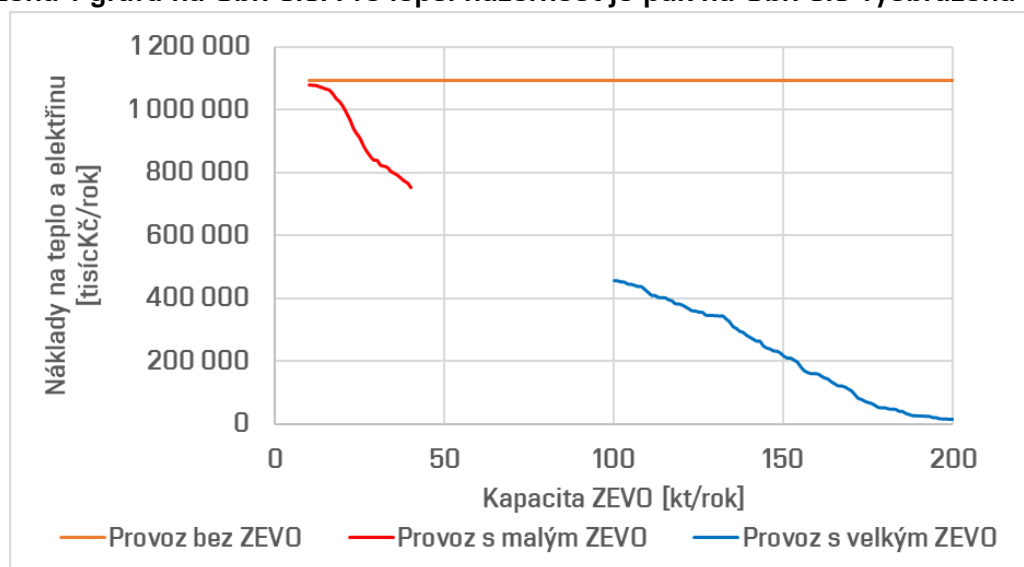
Dalším vstupním faktorem, který částečně souvisí s turbínami, je cena za MWh elektrické energie. Ta byla v modelu měněna, avšak jako výchozí sloužila cena 700 Kč/MWh, která byla zvolena na základě konzultací a byla dostatečně malá, že při ní mohlo docházet k odpojování kotlů.

### 6.2.3. Porovnání investičních a provozních nákladů

Provozními náklady jsou v této kapitole označeny v podstatě variabilní provozní náklady, od kterých je odečten výnos za prodej elektrické energie. Nevyjadřují tedy celkové provozní náklady, pouze ukazují tu nejvýznamnější položku variabilních nákladů, která bude po výstavbě ZEVO zmenšena. V nastaveném modelu je vždy uvažováno s tím, že oba existující černouhelné kotle lze plynule odstavit, v závislosti na poptávce po teple. Dále je model počítán pro první rok provozu. V nákladech tedy nejsou započítány nevyhnutelné další náklady, spojené s údržbou ZEVO. Model pouze hledá optimální nastavení výkonu kotlů vzhledem k co nejnižším nákladům na výrobu elektřiny a tepla.

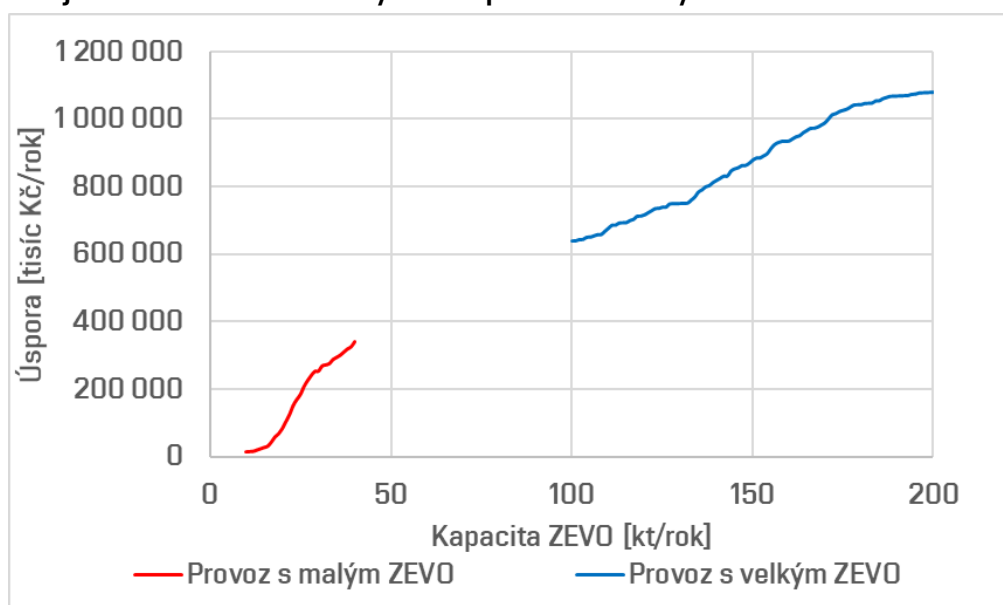
Náklady na výrobu elektrické a tepelné energie jsou závislé na celé řadě proměnných. Především se jedná o výkupní ceny elektřiny a cenu za palivo. Další významné proměnné jsou cena odpadu na bráně a také výhřevnost odpadu. Poslední jmenovaná veličina, tedy výhřevnost, byla brána jako konstantní o hodnotě 10 MJ/kg. Predikce výhřevnosti komunálního odpadu na základě daného regionu, ve kterém je SKO produkován, představuje poměrně komplexní problematiku, kterou se zabývá např. nástroj Justýna [45], vyvinutý na ÚPI. Pro účely této práce však byla ve všech výpočtech brána výhřevnost jako konstantní.

Pokud nebudeme počítat s žádným špičkovým zdrojem tepelné energie a s cenou uhlí 503,16 Kč, jak bylo určeno v kapitole 6.2.1, je pak vymodelovaná cena za teplo a elektřinu zobrazena v grafu na Obr. 6.5. Pro lepší názornost je pak na Obr. 6.6 vyobrazena celková



Obr. 6.5 Dětmovice - Náklady na elektřinu a teplo, bez ŠZTE

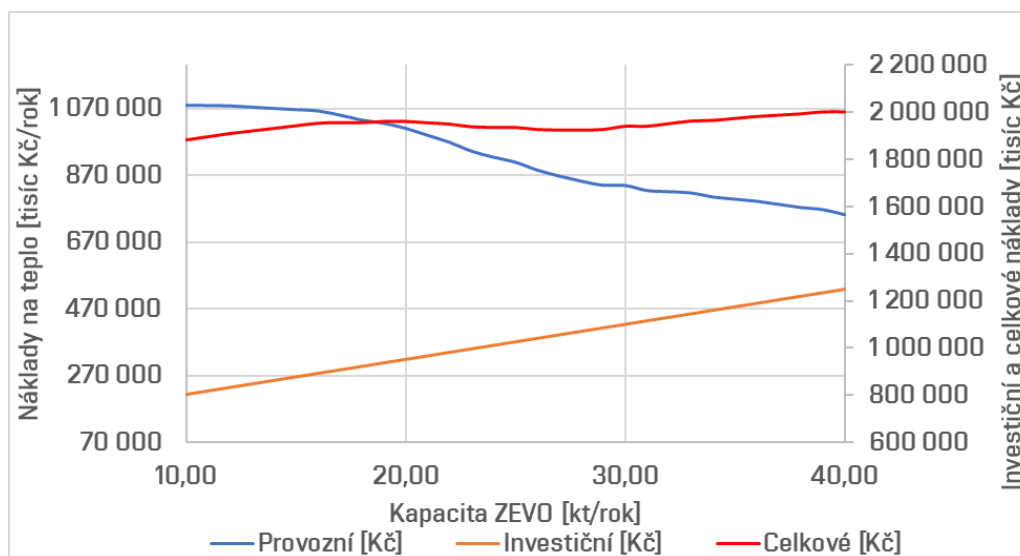
roční úspora, které bude dosaženo, pokud by došlo k implementaci ZEVO. Úspora je vypočítána jako rozdíl nákladů na výrobu tepla se zahrnutým ZEVO a bez zahrnutého ZEVO.



Obr. 6.6 Dětmovice - Úspora na elektřinu a teplo, bez ŠZTE

Simulace probíhaly vždy pro kapacity od 10 do 40 kt/rok, kdy bylo ZEVO bráno jako malé, s protitlakovou turbínou, a následně pro kapacity středního ZEVO od 100 do 200 kt/rok. U středního (které je v této práci pojmenováno jako „Velké“ pro lepší odlišení od „Malého“ do 40 kt/rok) zařízení pak byla uvažována dvoustupňová kondenzační odběrová turbína s odběrem páry po druhém stupni.

Při rozvaze o ekonomické rentabilitě je také dobré dát do srovnání i investiční náklady (způsob jejich výpočtu je popsán v kapitole 6.1). Na Obr. 6.7 je tedy poměrné porovnání provozních nákladů s náklady investičními. Křivka vyjadřující „celkové“ náklady je pak spíše ilustrační. Dalším důležitým ukazatelem je potom cena za GJ tepelné energie. Ta se

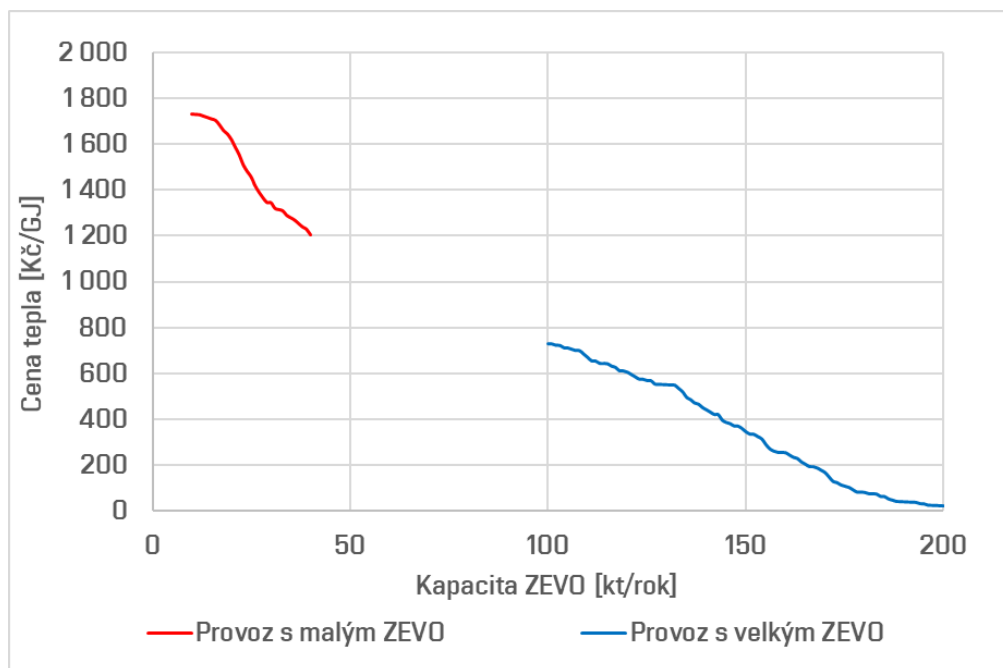


Obr. 6.7 Dětmarovice - srovnání nákladů pro malé ZEVO

samozřejmě také snižuje, neboť teplo pocházející ze ZEVO je v modelu HCCP bráno vlastně jako teplo vyrobené „zadarmo“ – palivo má v podstatě zápornou hodnotu ceny. Závislost ceny tepla na kapacitě ZEVO je zobrazena na Obr. 6.8. Vzhledem k tomu, že v rámci modelové situace je počítáno s faktem, že cena elektřiny je poměrně nízká a cena paliva vysoká, elektrická energie je vyráběna pouze jako nucený „meziprodukt“ při pokrytí poptávky po teple. Je však vidět, že s rostoucí kapacitou ZEVO se zvyšuje počet dnů, při kterých může dojít k odstávce „nevýhodně“ provozované teplárny a tím pádem k poklesu ceny tepelné energie.

Dalším kritériem pro hodnocení je IRR, neboli vnitřní výnosové procento, které bylo počítáno pomocí dalšího technicko-ekonomického modelu, který byl vyvinut pro potřeby dizertační práce na UPI [46], v kombinaci s výsledky z modelu HCCP. IRR lze také vyjádřit v závislosti na kapacitě, jak je tomu učiněno na Obr. 6.9. Výnosové procento je hlavním posuzovacím kritériem pro ekonomickou životnost ZEVO. Kapacity se záporným IRR, popřípadě s IRR které je příliš nízké, nemá cenu vůbec uvažovat. V modelovém případě, který byl vyobrazen na Obr. 6.9, se tedy jeví nejlépe kapacita 40 kt/rok.

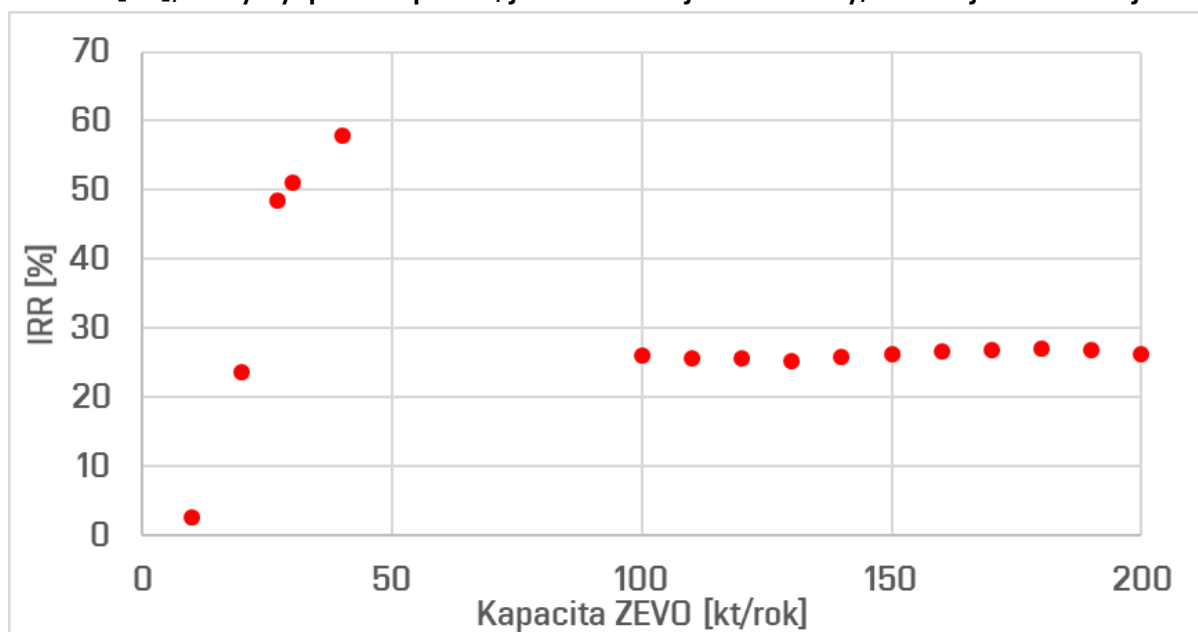
Je nutné podotknout, že pro modelový případ vychází IRR velmi vysoké. To je však pravděpodobně způsobeno tím, že v rámci výpočtu došlo k celé řadě zjednodušení – například nikde nejsou počítány náklady na odstávku primárních kotlů, primární kotle jsou brány jako absolutně měkké, s nulovou dobou náběhu atd. Pro účely této práce slouží IRR



Obr. 6.8 Dětmárovice - cena za GJ tepla, cena uhlí 504 Kč/MWh, cena elektřiny 700 Kč/MWh

spíše jako demonstrativní ukazatel hodnot kapacit, ve kterých je velký potenciál pro zúročení investice. Dále je také nutno zdůraznit, že v modelovém scénáři jsou extrémní ceny za palivo a elektřinu. Provoz elektrárny je za těchto podmínek v podstatě nevýhodný, elektřina je vyráběna jen v minimálním množství pouze jako meziprodukt při vykrytí poptávky po teple. Tento scénář byl volen především s ohledem na to, aby byl dobře rozpoznatelný vliv ZEVO při integraci do procesu (odstavování primárních kotlů). Lze tedy předpokládat, že v reálné situaci by IRR dosahovalo výrazně nižších hodnot.

IRR [47] vyjadřuje hodnotu zhodnocení investice a je tedy obvykle hlavním kritériem, dle kterého se investor rozhoduje, zda investici provede. V technologicko-ekonomickém modelu [46], který byl pro IRR použit, jsou rozhodujícími faktory, ovlivňujícími IRR zejména



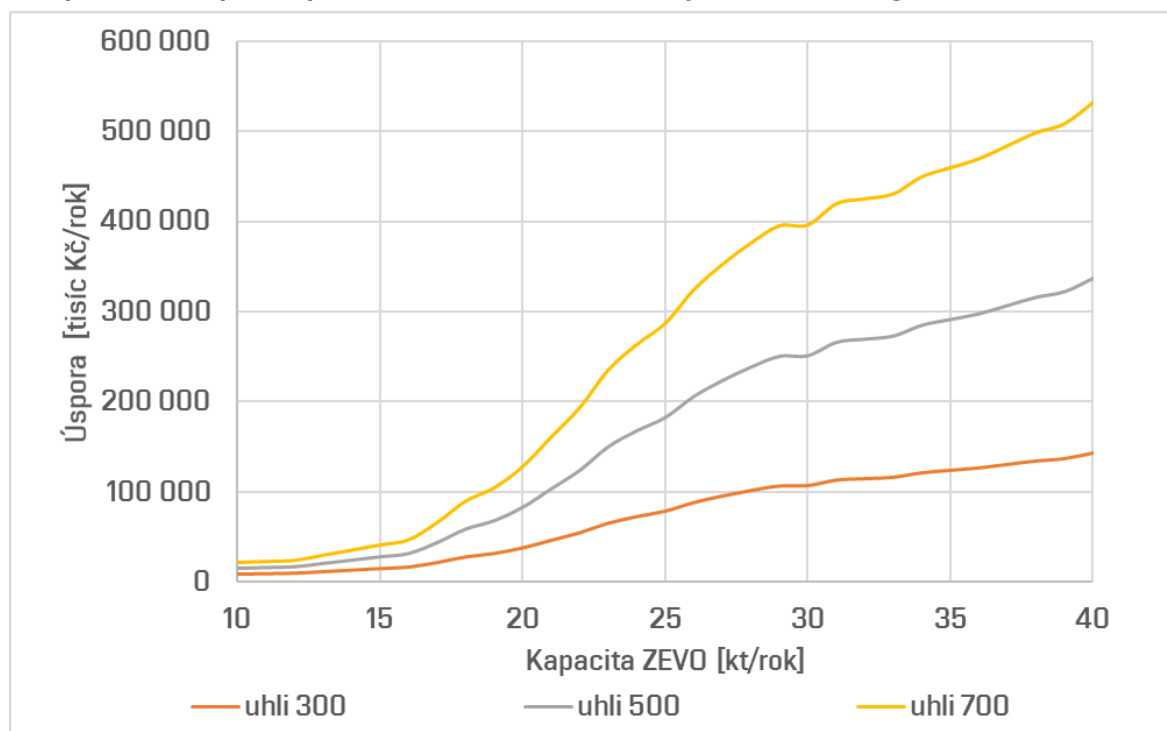
Obr. 6.9 Dětmárovice - IRR, bez ŠZTE, cena uhlí 504 Kč/MWh, cena elektřiny 700 Kč/MWh

kapacita, cena na bráně za odpad, průměrný elektrický výkon turbíny a především úspora při výrobě tepelné energie. Zatímco cena za odpad byla zafixována na již zmíněných 1700 Kč/t, elektrický výkon turbíny je závislý na kapacitě a u ZEVO s KOT také na množství odebírané páry pro účely prodeje tepla do CZT.

#### 6.2.4. Analýza podstatných faktorů ovlivňujících cenu tepla

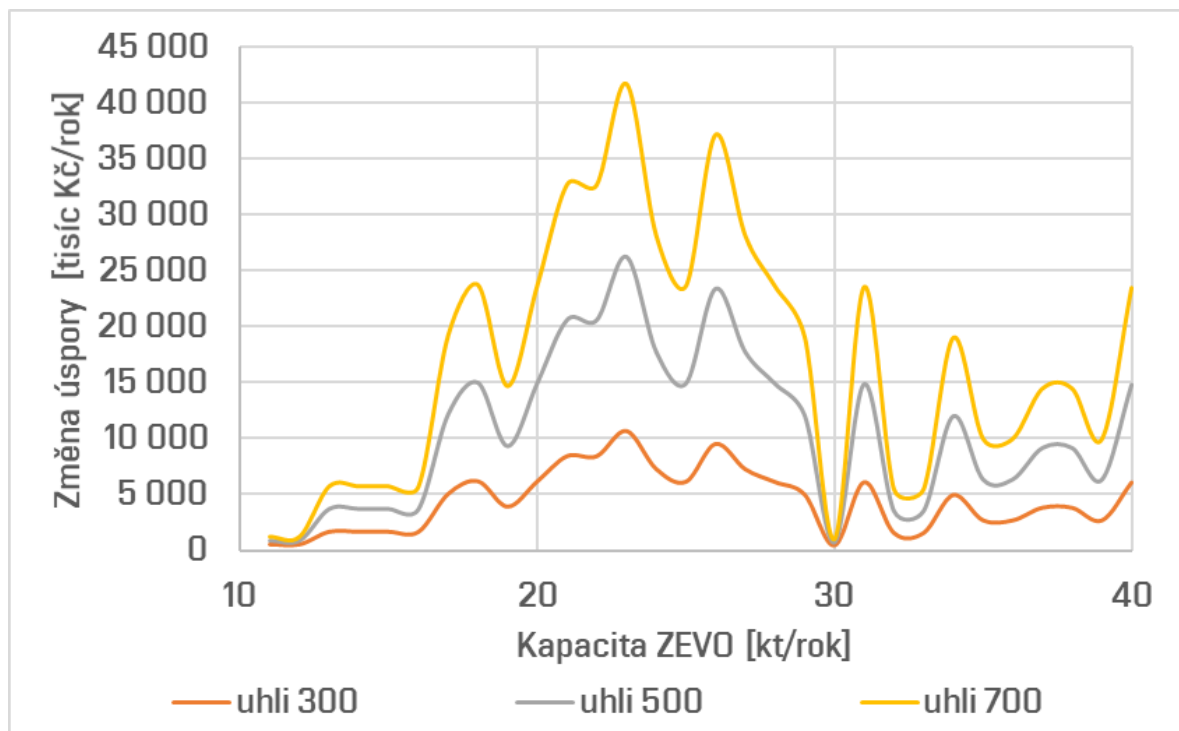
##### Analýza ZEVO o kapacitě 10 – 40 kt/rok

Hlavním cílem této práce je identifikace a kategorizace hlavních faktorů, které cenu tepla, potažmo elektrické energie, ovlivňují. Jako první podstatný faktor byla zkoumána cena primárního paliva, vyjádřená za energii 1 MWh, a její závislost na velikosti úspory. Ta může být poměrně dobře demonstrována na příkladu malého ZEVO, jak je zobrazeno v grafu na Obr. 6.10. Poměrně nepřekvapivě se zde ukazuje, že potenciál pro ZEVO je do značné míry ovlivněn právě cenou primárního paliva. Čím je primární palivo dražší, tím je větší roční úspora na nákladech spojených s výrobou tepelné, potažmo elektrické energie. Zároveň se ukazuje, že velikost změny úspor je od určité úrovně ceny primárního paliva na této ceně závislá. Výše hraniční ceny souvisí s poměrem mezi výkupní cenou elektrické energie a cenou primárního paliva. V modelu bylo uvažováno s primárními kotli jako s tzv. „měkkými“ zdroji, tedy takovými, které mohou být odpojeny. Lze také odpozorovat závislost velikosti změny úspory na kapacitě ZEVO. Závislost změny (difference) úspor na ceně primárního paliva pro malé ZEVO do 40 kt/rok je zobrazena v grafu na Obr. 6.11.



Obr. 6.10 Závislost úspory na ceně primárního paliva

Ukazuje se, že největší nárůst úspor s rostoucí kapacitou je patrný od kapacit 17 kt/rok do kapacit 29 kt/rok. To je způsobeno růstem výkonu ZEVO, které je v tomto rozmezí schopno „pokrýt“ samo poptávku po teple v rychle rostoucím počtu dnů (čím vyšší je kapacita, tím větší je výkon a tím více dní dokáže ZEVO pokrýt poptávku po teple samo). Dle výpočetního modelu se tedy zvyšuje počet dní, kdy může dojít k odstávce primárních kotlů.



Obr. 6.11 Závislost difference úspory na ceně primárního paliva

Dalším důležitým faktorem z hlediska ekonomiky ZEVO je cena za MWh elektrické energie. Ta byla zkoumána při uvažování tzv. měkkých zdrojů, tedy takových primárních zdrojů tepla, které mohou být odpojeny. K tomu dochází zejména v tom případě, pokud je cena za elektřinu příliš nízká a model tedy vyhodnotí, že se nevyplatí provoz kotlů. Z důvodu odstávky redundantních kotlů je také vhodné uvažovat větší ZEVO – čím blíže bude ZEVO hranici, kdy bude schopno pokrýt většinu poptávky, tím je větší šance, že dojde k odstávce primárních uhelných kotlů. Hodnoty ročních kapacit pro takovéto výkony, respektive množství denního vyrobeného tepla, kde lze i očekávat největší změny v úsporách, lze při respektování hodnot pracovního fondu 8088 h/rok, účinnosti ZEVO 0,845 a LVH odpadu 10 MJ/kg (hodnoty přednastavené v modelu HCCP) přibližně určit dle rovnice:

$$C_x = \frac{Q_{ZEVO} \cdot T_{pr} \cdot 3,6}{1000 \cdot LVH_o \cdot \eta} = \frac{Q_{ZEVO} \cdot 8088 \cdot 3,6}{1000 \cdot 10 \cdot 0,845} [kt/rok] \quad (16)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

$Q_{ZEVO}$	.....	Denní vygenerované teplo [MWh]
$C_x$	.....	Roční kapacita ZEVO [kt/rok]
$LVH_o$	.....	Výhřevnost odpadu [MJ/kg]
$T_{pr}$	.....	Roční pracovní fond [h/rok]

Výkony, kde lze očekávat nejviditelnější skoky v úsporách, lze vyčíst z diagramu denního tepelného zatížení, který je obdobou diagramu hodinového zatížení z Obr. 2.5, o kterém bylo pojednáno v podkapitole 2.3. Diagram denního tepelného zatížení pro lokalitu Dětmárovice je zobrazen na Obr. 6.12 i s vyznačenými přibližnými příslušnými hodnotami kapacit ZEVO. Ty byly vypočítány dle rovnic obdobných jako rovnice výše, nejprve pro denní potřebu tepla 4,8 MWh dle rovnice:

$$C_1 = \frac{Q_1 \cdot T_{pr} \cdot 3,6}{1000 \cdot LVH_o \cdot \eta} = \frac{4,8 \cdot 8088 \cdot 3,6}{1000 \cdot 10 \cdot 0,845} \doteq 16,54 \text{ [kt/rok]} \quad (17)$$

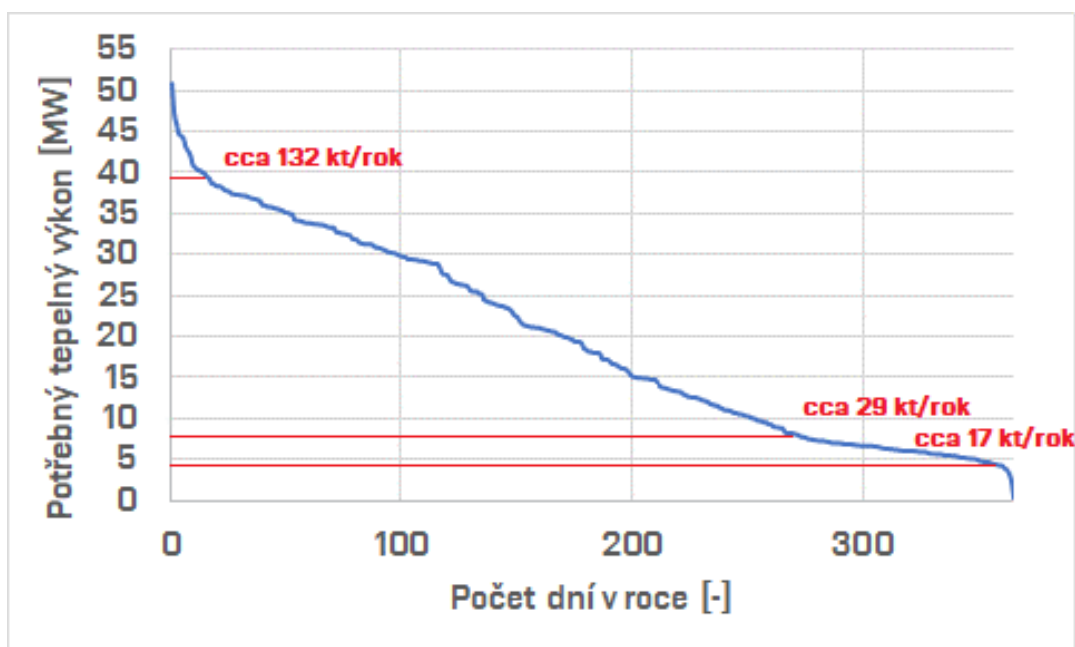
Prvním zajímavým bodem je tedy kapacita 17 kt/rok (zaokrouhleno na celá čísla nahoru). Další bod je poté v místě denní spotřeby 8,4 MWh:

$$C_2 = \frac{Q_2 \cdot T_{pr} \cdot 3,6}{1000 \cdot LVH_o \cdot \eta} = \frac{8,4 \cdot 8088 \cdot 3,6}{1000 \cdot 10 \cdot 0,845} \doteq 28,94 \text{ [kt/rok]} \quad (18)$$

Další zkoumaná kapacita byla tedy zvolena jako 29 kt/rok. Poslední zkoumaná kapacita pak byla stanovena dle denní spotřeby 38,2 MWh:

$$C_3 = \frac{Q_3 \cdot T_{pr} \cdot 3,6}{1000 \cdot LVH_o \cdot \eta} = \frac{38,2 \cdot 8088 \cdot 3,6}{1000 \cdot 10 \cdot 0,845} \doteq 131,63 \text{ [kt/rok]} \quad (19)$$

Posledním zkoumaným bodem je tedy kapacita 132 kt/rok. Kapacity  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$  jsou zaneseny v kontextu denní spotřeby na Obr. 6.12. Zde je také vidět, proč byly voleny právě takovéto hodnoty denní spotřeby (poptávky) tepelné energie. Význam těchto bodů může být také demonstrován na Obr. 6.11., kde lze vyčíst, že mezi hodnotami kapacit 17 a cca 29 kt/rok rostou úspory v závislosti na kapacitě velmi „rychle“.



Obr. 6.12 Diagram denního tepelného zatížení, lokalita Dětmárovice

Následně byla pro ZEVO „malých“ kapacit do 40 kt/rok provedena analýza vzájemného vztahu mezi cenou primárního paliva a výkupní cenou elektrické energie. Pro malé kapacity byla při tomto zkoumání „zafixována“ velikost kapacity na hodnotě 29 kt/rok. Bylo



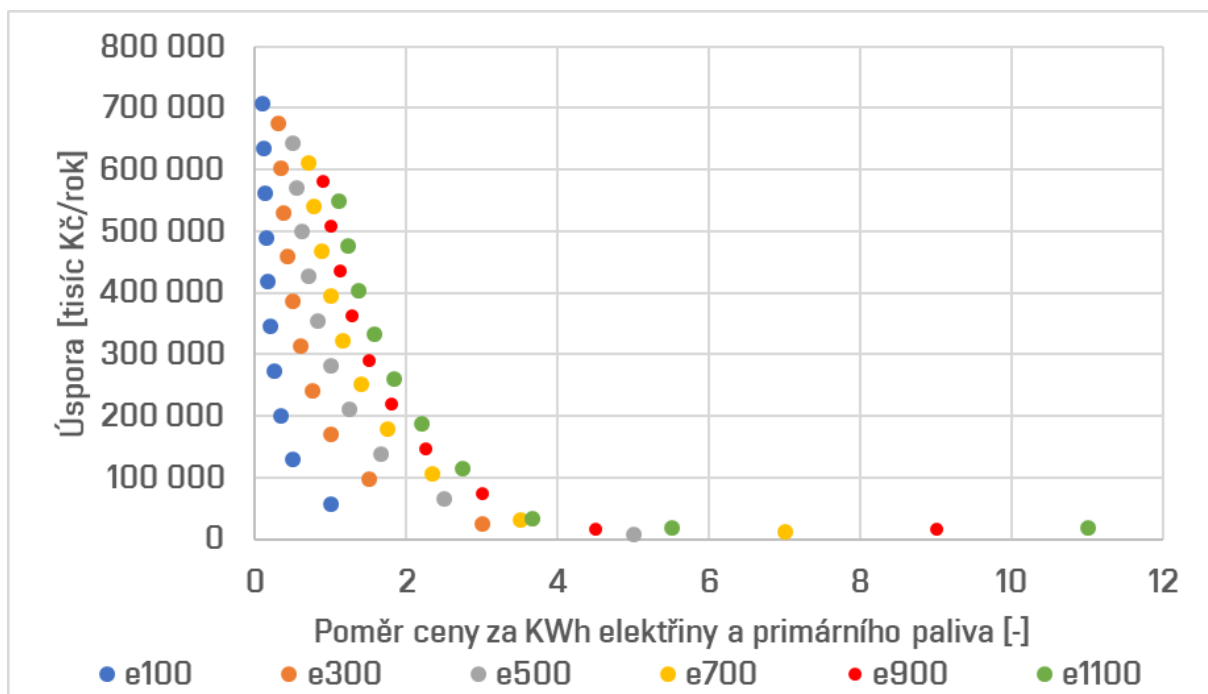
zkoumáno, do jaké míry je velikost úspory závislá na poměru nákupní ceny primárního paliva a výkupní ceny elektrické energie dle rovnice:

$$RATIO = \frac{Price_{el}}{Price_{fuel}} \quad (20)$$

Kde jednotlivé koeficienty znamenají:

$Price_{el}$	.....	Výkupní cena elektřiny [Kč/MWh]
$Price_{fuel}$	.....	Nákupní cena prim. paliva [Kč/MWh]

V tomto bodě existuje reálný předpoklad, že změny úspor budou nejviditelnější – ZEVO je již schopno pokrýt podstatnou část poptávky po teple, například v letních měsících. Tím pádem může docházet k častějšímu vypínání primárních kotlů a tím pádem zvětšení úspory. Výsledná závislost na výše uvedeném poměru je vyobrazena v bodovém grafu na Obr. 6.13. Podoba závislosti byla poté porovnána se stejnou závislostí, provedenou pouze pro větší kapacitu, jak je uvedeno níže.

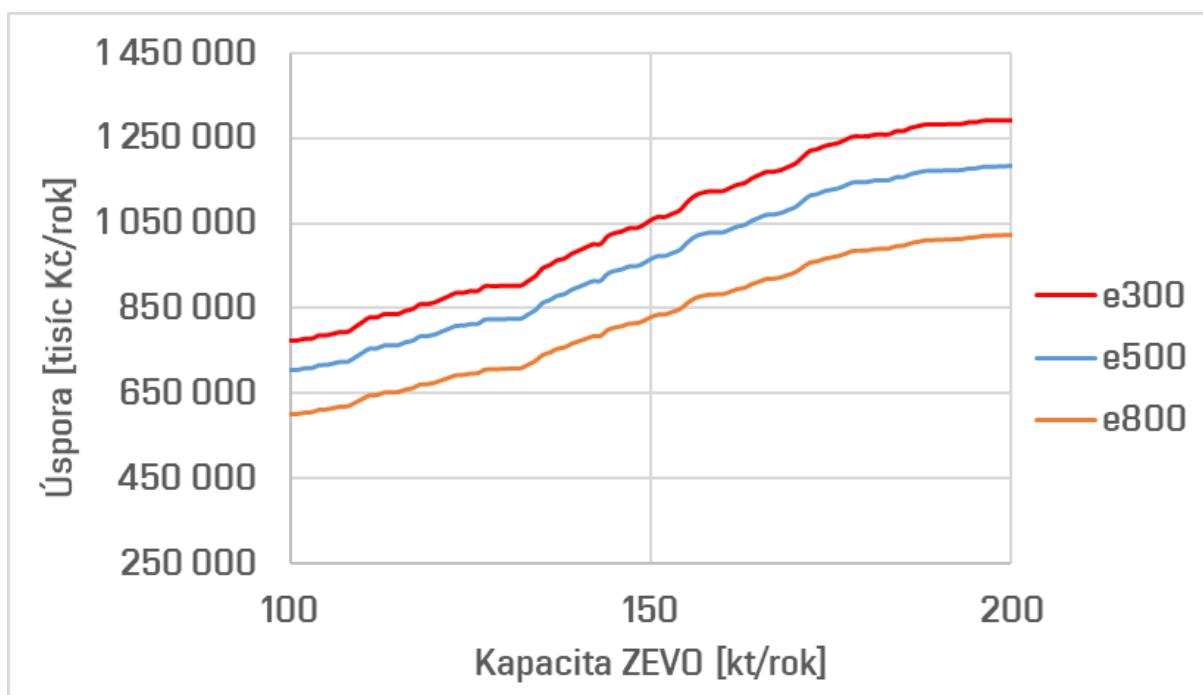


Obr. 6.13 Závislost úspory na poměru ceny elektřiny a primárního paliva, kapacita 29 kt/rok, Dětmorovice

## Analýza ZEVO o kapacitě 100– 200 kt/rok - Dětmorovice

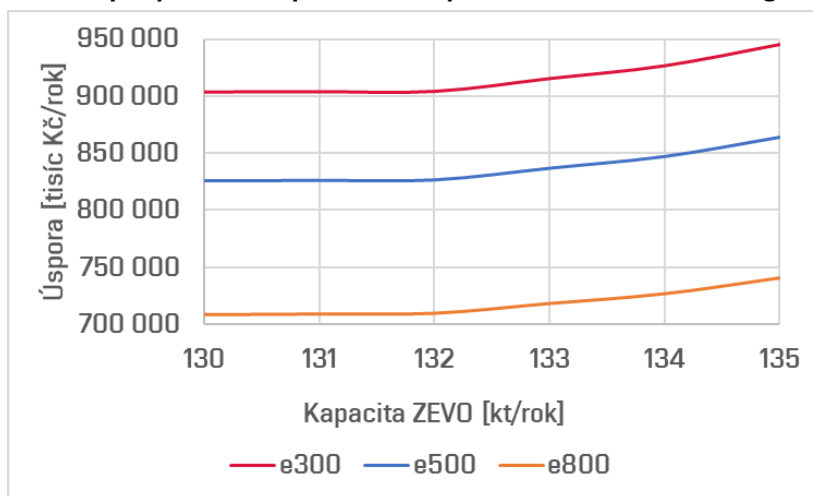
U těchto kapacit byla prvotní analýza provedena při zafixované ceně za primární palivo, a tedy z hlediska závislosti na ceně elektřiny. To bylo provedeno z důvodu předpokladu, že při takovýchto kapacitách je již ZEVO schopno vyrobit dostatečné množství energie pro pokrytí velké části poptávky po teple a cena elektřiny tedy bude hlavní faktor, který bude ovlivňovat, zda dojde z hlediska modelu k vypnutí primárních kotlů.

Závislost úspory peněz na různých cenách za elektrickou energii je vyobrazena v grafu na Obr. 6.15. Stojí za povšimnutí, že vývoj úspory v závislosti na kapacitě zařízení se ztelně



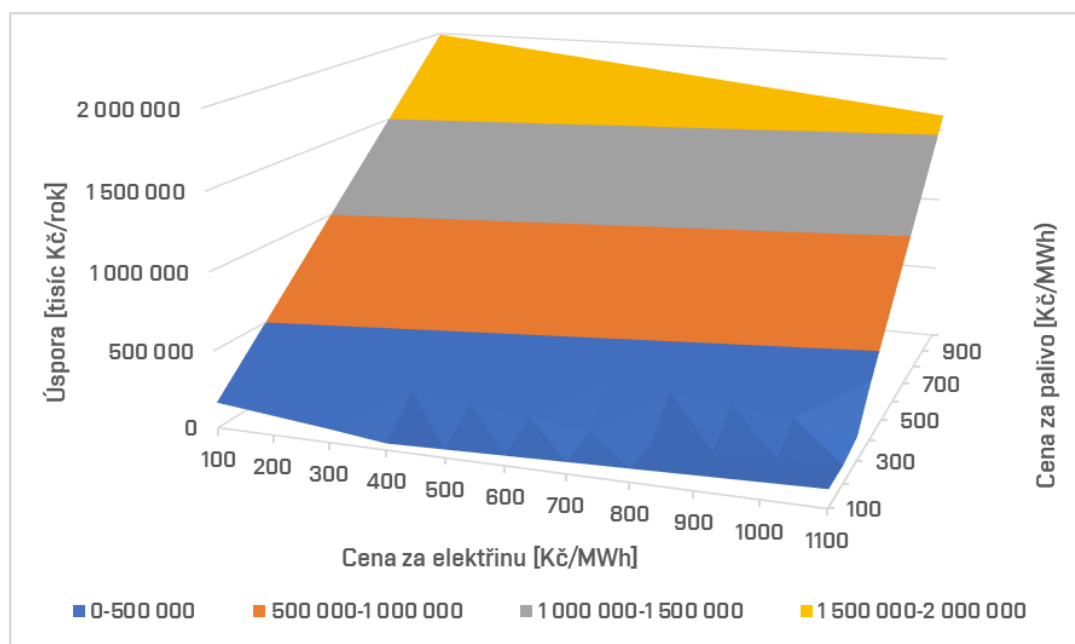
Obr. 6.15 Závislost úspory na ceně za kWh elektrické energie

mění dle předpokladu v okolí hodnoty kapacity 132 kt/rok. Detailnější pohled na tuto závislost je vyobrazen na Obr. 6.14. Tato hodnota kapacity byla tedy zvolena pro detailnější analýzu závislosti úspory na ceně primárního paliva a elektrické energie.



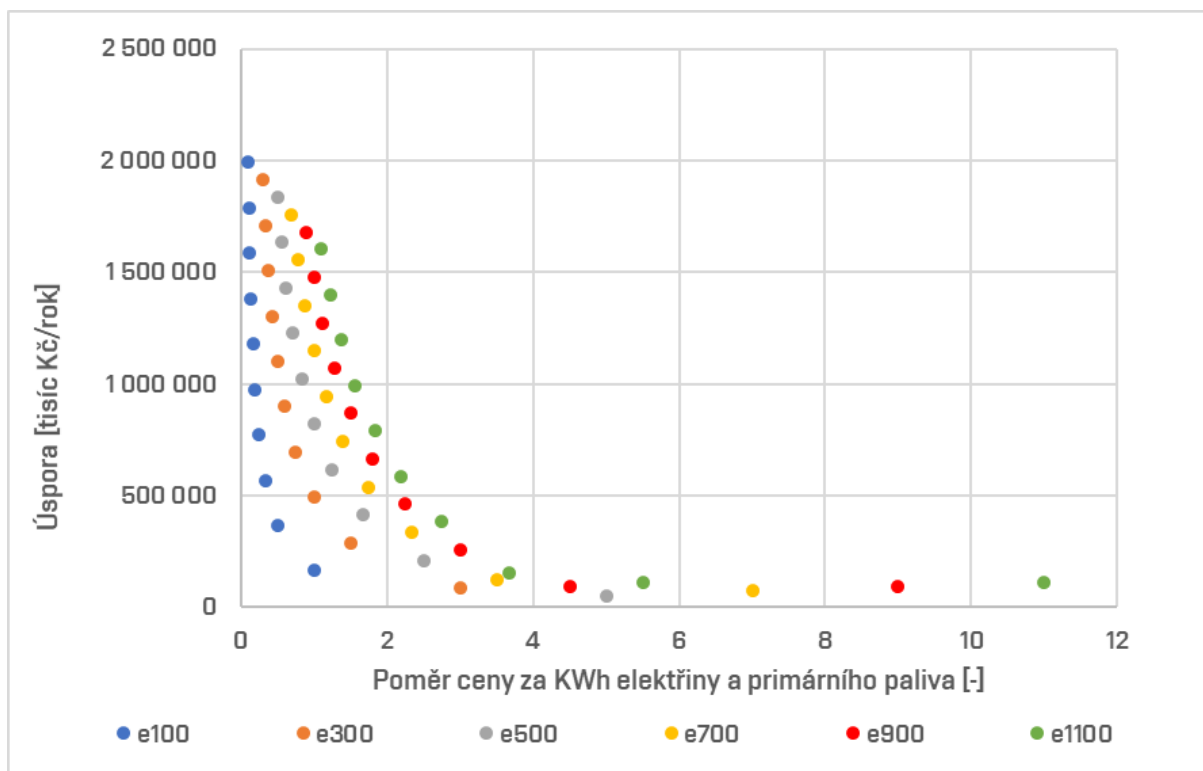
Obr. 6.14 Detail závislosti úspory na ceně elektrické energie

Jak bylo napsáno výše, jako fixovaný bod velikosti roční kapacity ZEVO byla zvolena hodnota 132 kt/rok. „Zafixování“ na jedné velikosti kapacity umožňuje detailnější analýzu problematiky, včetně detailnějšího grafického zobrazení, jak je ukázáno na Obr. 6.16. Zde



Obr. 6.16 Závislost úspory při kapacitě 132 kt/rok na cenách elektřiny a primárního paliva

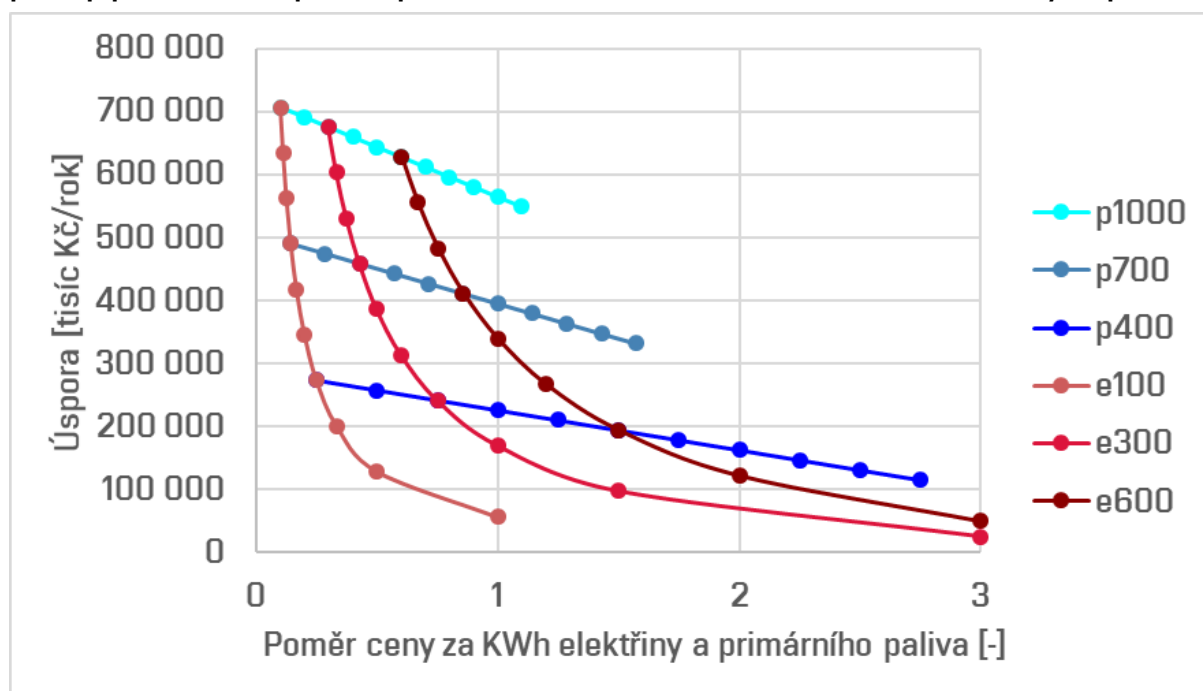
je jasné vidět, že největších úspor při výstavbě ZEVO lze dosáhnout při vysokých cenách primárního paliva a nízkých výkupních cenách elektrické energie. Stejně jako v případě malých ZEVO, i zde byla závislost velikosti úspory vyjádřena ve vztahu k poměru mezi cenou za elektřinu a cenou za primární palivo, jak je vyobrazeno na Obr. 6.17.



Obr. 6.17 Závislost úspory na poměru ceny elektřiny a primárního paliva, kapacita 132 kt/rok, Dětmovice

Na první pohled je vidět, že závislosti vykreslené na Obr. 6.17. a Obr. 6.13. jsou si velmi podobné. Ukazuje se, že velikost úspory, a tedy i velikost IRR, nejsou závislé přímo na poměru výkupní ceny za energetickou jednotku elektřiny a nákupní ceny za stejnou energetickou jednotku primárního paliva.

Naopak se však ukazuje, že každá cena za elektřinu ohraničuje určitou oblast zisků, stejně tak jako cena za primární palivo. To lze demonstrovat na případě malých ZEVO, pro tento účel přehledněji vyobrazených na Obr. 6.13. Je jasné vidět, že lze najít určité cenové hladiny, které jsou ohraničeny buď cenou za elektřinu, nebo cenou za palivo. Pokud tento princip platí obecně, pak lze pro každou lokalitu určit minimální hodnotu ceny za primární



Obr. 6.18 Vliv cen elektřiny a paliva na úsporách, kapacita 29 kt/rok, Dětmarovice

palivo a maximální cenu za elektřinu, kterou lze uvažovat, aby bylo v dané lokalitě dodrženo požadované IRR. Na základě této informace by mohly být zpřesněny ekonomické investiční odhady pro konkrétní lokalitu – v lokalitě by mohla být vypracována studie, která bude analyzovat, zda nemůže za dobu provozu například dojít v dané lokalitě k překročení limitních cen a tím pádem k nedodržení požadovaného IRR.

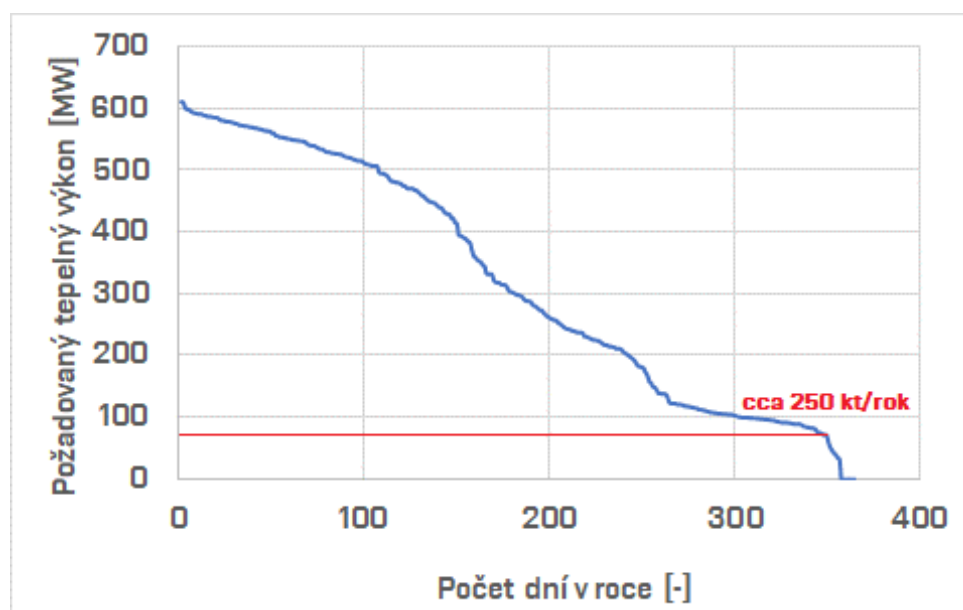
### 6.3. Model Mělník I

Jak již bylo zmíněno ve stručném popisu této lokality v podkapitole 5.2, data k modelu v této lokalitě byla autorovi poskytnuta. Celý model slouží především jako srovnávací k modelu Dětmárovice. Hlavním rozdílem je počet a velikost kotlů, případně turbín (v případě lokality Mělník je v rámci modelu počítáno se 4 kotli a 4 turbínami), a především větší poptávka po tepelné energii.

V případě lokality Mělník I tedy z pohledu této práce nemá smysl popisovat, jak byly získány regresní koeficienty turbín, popřípadě jak byla získána cena primárního paliva. Lze tedy přímo provést analýzu závislosti na ceně elektřiny a tepla při konkrétní kapacitě. V rámci této lokality nebyla prováděna větší analýza závislosti úspory na kapacitě při fixovaných cenách za elektřinu a primární palivo.

#### Nalezení analyzované kapacity ZEVO

V lokalitě Mělník bylo využito již nabyté zkušenosti, že nejlépe viditelné rozdíly v úspoře jsou v takových bodech, kde je ZEVO schopno pokrýt dostatečné množství požadovaného tepelného výkonu samo. Dále je využito poznatku, že takovéto výkony lze odečíst z diagramu denního tepelného zatížení, který je pro tuto lokalitu vyobrazen na Obr. 6.19.



Obr. 6.19 Diagram denního tepelného zatížení, lokalita Mělník

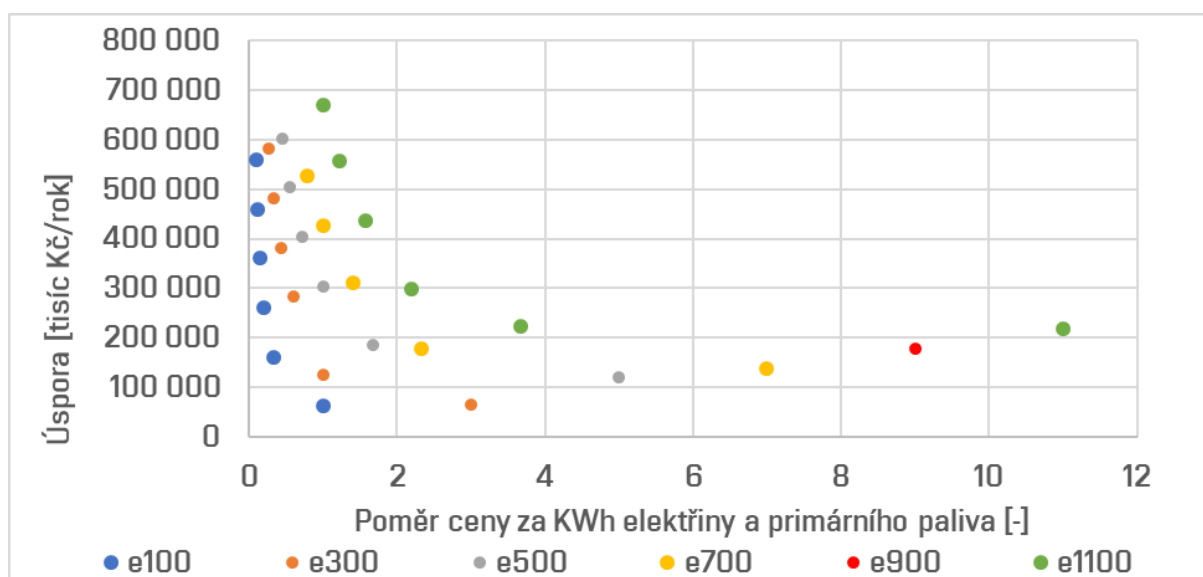
Príslušná kapacita ZEVO byla vypočítána podle v této práci již použité rovnice:

$$C_1 = \frac{Q_1 \cdot T_{pr} \cdot 3,6}{1000 \cdot LVH_o \cdot \eta} = \frac{72,35 \cdot 8088 \cdot 3,6}{1000 \cdot 10 \cdot 0,845} \doteq 249,3 \text{ [kt/rok]} \quad (21)$$

Kapacita, která byla „zafixována“ pro další výpočty, byla tedy zvolena jako 250 kt/rok. To je větší kapacita, než jaká byla řešena v rámci minulé lokality, avšak výpočetní model HCCP analýzu takovéto kapacity umožňuje.

### Analýza závislosti úspory na cenách elektřiny a tepla – Mělník I

Stejně jako v předchozím modelovém případě u lokality Dětmárovice, i zde byly provedeny simulace při změně cen za energetickou jednotku elektřiny a primárního paliva. Vývoj úspor, jakožto hlavního faktoru, který ovlivňuje velikost IRR, byl obdobně jako u předchozí lokality zanesen do grafu na základě vzájemného poměru ceny za elektřinu a palivo. Vývoj je zanesen na Obr. 6.20.

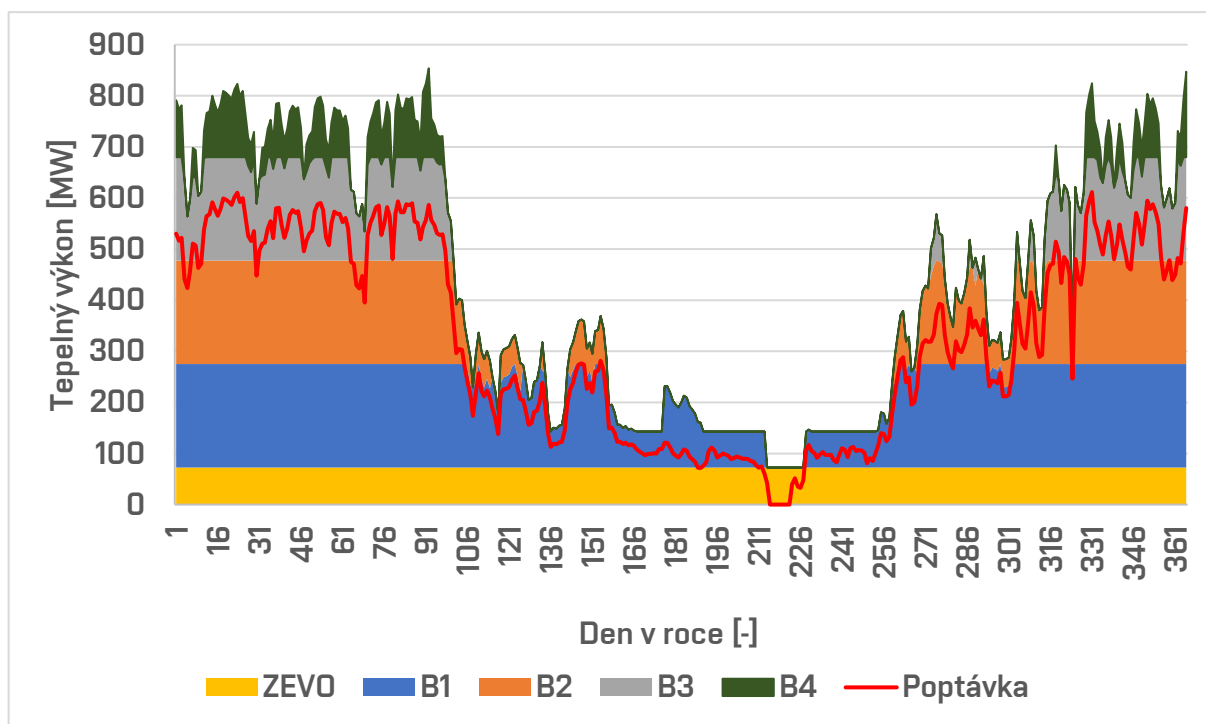


Obr. 6.20 Závislost úspory na poměru ceny elektřiny a primárního paliva, kapacita 250 kt/rok, Mělník

I zde lze pozorovat závislost nikoliv přímo na vzájemném poměru, ale především na konkrétní ceně za elektřinu nebo primární palivo. Závislost se však nejvíce podobá jako v případě předchozí lokality. I tak se u obou závislostí vyskytují jisté podobnosti a lze se tedy domnívat, že v obou případech může pro každou zvažovanou kapacitu existovat oblast ohraničená minimální cenou za primární palivo a maximální výkupní cenou za elektřinu, která udává přípustnou ekonomickou rentabilitu (z hlediska IRR) zvažovaného ZEVO.

## Demonstrace společné funkce kotlů

Kromě analýzy úspor lze na příkladu lokality Mělník demonstrovat společné fungování více kotlů v rámci dodávek do jedné CZT. U lokality Dětmárovice by takové zobrazení nemělo příliš smysl, neboť výkon jediného kotle je tak velký, že bez problémů překrývá potřebný výkon pro pokrytí denní poptávky po teple. Na grafu, který je zobrazen na Obr. 6.21, lze velmi



Obr. 6.21 Demonstrace společného fungování více kotlů v rámci jedné CZT, lokalita Mělník, ZEVO 250 kt/rok

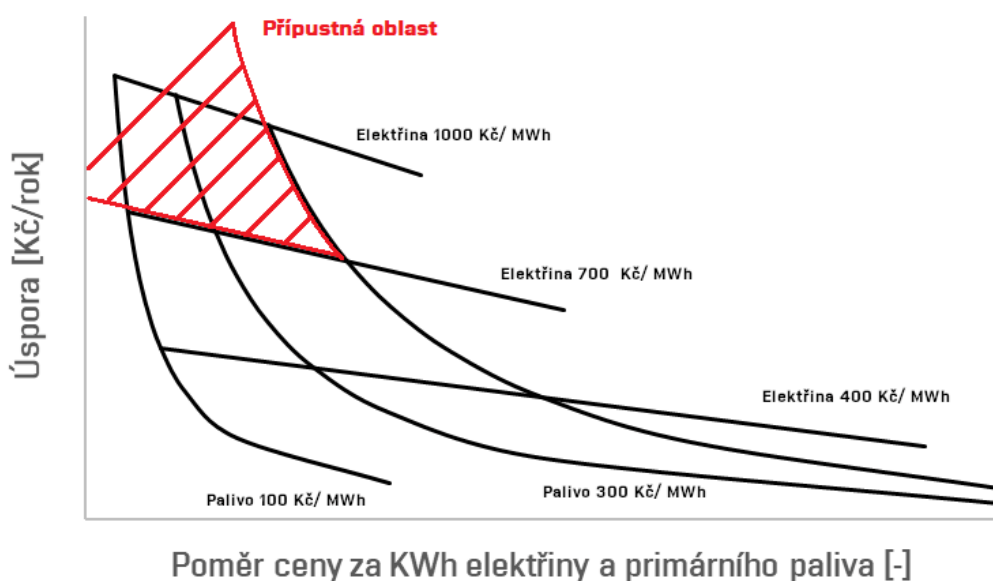
dobře pozorovat, jakým způsobem je rozdělena „funkce“ mezi jednotlivými kotli. Zatímco u ZEVO je počítáno s nepřetržitým provozem (v tomto případě je zanedbána potřeba nutné krátké odstávky z hlediska údržby), kotel B1 a zejména B2 jsou v provozu na plný výkon pouze v zimních měsících. Kotel B3 a především viditelně B4 fungují spíše jako ŠZTE. Je také vidět, že existuje nadprodukce energie (respektive celkový sečtený výkon je větší než výkon požadovaný poptávkou). To je dáno tím, že ne všechn výkon je využit k prodeji do CZT, ale podstatná část je také využívána pro generování elektrické energie.

## Závěr

V rámci práce byla provedena rešeršní studie problematiky zařízení pro energetické využití odpadu v kontextu teplárenství. Dále pak byly v rámci práce analyzovány faktory, které přímo ovlivňují ekonomickou rentabilitu a soběstačnost ZEVO. Vzhledem k tomu, že ZEVO představuje poměrně náročnou investici, je potřeba mít k dispozici co možná nejpresnější modely, které umožňují posoudit její návratnost.

Tato práce si kladla za cíl identifikovat takové proměnné faktory, které jsou pro dobré zúročení investice podstatné. Zatímco faktory jako je výhřevnost odpadu, či cena za zpracování odpadu, jsou velmi často diskutované, není obvykle počítáno s tím, zda se v dané lokalitě nezmění některé další parametry, které ovlivní ekonomiku budoucího ZEVO. Pro analýzu podstatných faktorů byly v rámci práce vypracovány dvě případové studie ve dvou rozdílných lokalitách. Zejména lokalita Dětmárovice pak byla detailněji zkoumána, k čemuž sloužil výchozí scénář provozu, ve kterém bylo počítáno s relativně extrémními podmínkami cen za primární palivo a elektrickou energii. To umožnilo snazší rozpoznání zkoumaných faktorů při následné integraci ZEVO do sítě.

V práci bylo nastíněno, že existuje vztah mezi cenou za primární palivo, dostupné v lokalitě před integrací ZEVO, výkupní cenou elektřiny a finanční úsporou, plynoucí z instalace ZEVO. Při zvažování výstavby ZEVO se tedy jeví jako vhodné provést takovouto analýzu pro uvažovanou roční kapacitu zpracování a stanovit hranice cen elektřiny a paliva, pro které bude ZEVO ještě dostatečně rentabilní. Příklad, jak by poté mohla vypadat graficky interpretovaná přípustná provozní oblast se nalézá na Obr. 0.1. Dále je pak možné pro každou lokalitu provést analýzu možnosti dodržení podmínek rentability. Tím lze zlepšit kvalitu odhadu návratnosti investice ZEVO a usnadnit tak případnému investorovi rozhodování, zda vložit do takového projektu svůj kapitál.



Obr. 0.1 Existence přípustné oblasti cen elektřiny a primárního paliva



## Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka / Symbol	Význam
KO	Komunální odpad
SKO	Směsný komunální odpad
EVO	Energetické využití odpadu
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadu
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
BP	Bioplyn
TZS	Technické zabezpečení skládek
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
CZT	Centrální zásobování teplem
PT	Protitlaková turbína
KOT	Kondenzační odběrová turbína
SCZT	Sít centrálního zásobování teplem
ŠZTE	Špičkový zdroj tepelné energie
LVH	Lower heating value, česky „výhřevnost“
TZL	Tuhé znečišťující látky

## Bibliografie

- [1] CONNOLLY, David, Brian VAD MARHIESEN, Poul ØSTERGAARD, Bernd MÖLLER, Steffen NIELSEN a Henrik LUND. *Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27*. 1. Aalborg: Department of Development and Planning, Aalborg University, 2013. ISBN 978-87-91404-48-1.
- [2] NEVRLÝ, Vlastimil. *Location of Mixed Municipal Waste Treatment Facilities: Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions*. Brno, 2019.
- [3] *PRODUKCE, VYUŽITÍ A ODSTRANĚNÍ ODPADŮ GENERATION, RECOVERY AND DISPOSAL OF WASTE: Za období 2017*. 1. Praha: Český statistický úřad, 2018, 44 s. CSU-03249/2018-54. Dostupné také z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2017>
- [4] *VISOH* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2002 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://isoh.mzp.cz/>
- [5] ČESKO. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Sagit, 2001, ročník 2001, částka 71, číslo 185. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [6] ČR. *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024*. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2014, ročník 2014, částka 141, číslo 352. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/cz/plan\\_odpadoveho\\_hospodarstvi\\_cr](https://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr)
- [7] JUNGA, Petr. *Technika pro zpracování odpadů (2): Skládky odpadů a technologické linky třídění odpadů*. 1. Brno: Agronomická fakulta MENDELU, 2015. Dostupné také z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/files/210/17166.pdf](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/210/17166.pdf)
- [8] *SAKO* [online]. Brno: SAKO Brno , a.s., 2019 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [www.sako.cz](http://www.sako.cz)
- [9] MUŽÍK, Oldřich a Jaroslav KÁRA. Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2019-04-14]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>
- [10] ČERVENÁ, Krystýna. *Biologické metody zpracování odpadu* [online]. Ostrava: VŠB, 2019 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/index.html>
- [11] DVOŘÁKOVÁ, Ilona. Seznam spaloven odpadů v ČR. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: MZP, 2006 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/emise/spalovny/index.html>
- [12] *Confederation of European Waste-to-Energy Plants* [online]. Dusseldorf: CEWEP e.V., 2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: [www.cewep.eu](http://www.cewep.eu)

- [13] ČESKO. Vyhláška o katalogu odpadů. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Sagit, 2016, ročník 2016, částka 38, číslo 93. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=93&r=2016>
- [14] *Česká bioplynová asociace* [online]. České Budějovice: ČSBA, 2007 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/>
- [15] ČESKO. *Zákon o ochraně ovzduší*. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012, ročník 2012, číslo 201. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201?citace=1>
- [16] ČESKO. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Sagit, 2012, ročník 2012, částka 151, číslo 415. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=415&r=2012>
- [17] ČR. *Vyhláška, kterou se mění vyhlášky č. 294/2005 Sb., 383/2001 Sb., 383/2001 Sb.* In: . Praha: MŽP, 2016, ročník 2016, číslo 387. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-387>
- [18] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady o odpadech a o zrušení některých směrnic*. In: . Štrasburk: EP, 2008, ročník 2008, číslo 98. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex:32008L0098>
- [19] EU. *NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 1013/2006 ze dne 14. června 2006 o přepravě odpadů*. In: . b.r., ročník 2006. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1013/oj>
- [20] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění): 2010/75/EU*. In: . Brusel: EU, 2010, ročník 2010, číslo 75. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu>
- [21] *Naše teplo* [online]. Praha: Teplárenské sdružení České republiky, 2019 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: [www.naseteplo.cz](http://www.naseteplo.cz)
- [22] KARAFIÁT, Josef. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla*. 1. Praha: ORTEP, s.r.o., 2006.
- [23] LIU, Mingxi, Yang SHI a Fang FANG. Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 35, 1-22 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.054. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114002263>
- [24] WERNER, Sven. International review of district heating and cooling. *Energy* [online]. 2017, 137, 617-631 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.045. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054421730614X>
- [25] KARAFIÁT, Josef. *Popis systémů CZT: Historie, typy a principy KVET*. Praha: ORTEP, s.r.o., b.r. Dostupné také z: [https://www.powerwiki.cz/attach/Vyroba/Popis\\_systemu\\_CZT.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/Vyroba/Popis_systemu_CZT.pdf)

- [26] PUTNA, Ondřej, František JANOSTÁK, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS. Short-time Fluctuations and Their Impact on Waste-to-Energy: Conceptual Design Optimized by Multi-stage Stochastic Model. *Chemical Engineering transactions*. AIDIC, 2017, 2017(61). ISSN 2283-9216.
- [27] KOPECKÝ, V. *Integrace zařízení energetického využití odpadů do sítě centrálního zásobování teplem s existující teplárnou*. Brno, 2017, 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Ondřej Putna.
- [28] *Odpad je energie* [online]. Praha: STEO, 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/>
- [29] BALÁŠ, Marek. Spalovny odpadu - odpad jako palivo. *TZB info* [online]. 2014, , 1 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>
- [30] FERDAN, Tomáš, Radovan ŠOMPLÁK, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Martin PAVLAS a Lukáš FRÝBA. A waste-to-energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, 89, 1127-1136 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135943111500321X>
- [31] LEE, Shang-Hsiu, Nickolas THEMELIS a Marco CASTALDI. High-Temperature Corrosion in Waste-to-Energy Boilers. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2007, 16(1), 104-110 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1007/s11666-006-9005-4. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-006-9005-4>
- [32] DI MARIA, Francesco, Stefano CONTINI, Gianni BIDINI, Antonio BONCOMPAGNI, Marzio LASAGNI a Federico SISANI. Energetic Efficiency of an Existing Waste to Energy Power Plant. *Energy Procedia* [online]. 2016, 101, 1175-1182 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.159. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610216313686>
- [33] JANOŠŤÁK, František. *Uživatelský manuál pro software Heat-and-power plants cooperation*. Brno, 2018.
- [34] JANOŠŤÁK, František, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS. *Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant*. Ústav procesního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2019.
- [35] Elektrárna Dětmorovice. *Skupina ČEZ* [online]. 2019 [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/detmarovice.html>
- [36] JANUSZEK, Tomáš. ČEZ už dlouhodobě s dětmorovickou elektrárnou nepočítá. *Deník.cz* [online]. VLTAVA LABE MEDIA a.s, 2017, , 1 [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/ekonomika/cez-uz-dlouhodobě-s-detmarovickou-elektrarnou-nepocita-20170430.html>

- [37] VRÁTNÍK, . *Schéma Dětmárovice 200 MW: Blok č. 3 a 4*. Interní dokument. Doosan Plzeň, 2010.
- [38] *Databáze CZT*. Interní sběr dat, Ústav Procesního inženýrství, 2018. Dostupné také z: Interně
- [39] Elektrárna Mělník. *Skupina ČEZ* [online]. 2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/melnik.html>
- [40] *Analýza potenciálu energetického využití odpadů v ČR včetně ekonomického a regionálního vyhodnocení*. 1. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2016. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty\\_po8\\_opzp\\_2007\\_2013/\\$FILE/OODP-4\\_3\\_MZP\\_FIN-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_3_MZP_FIN-20160810.pdf)
- [41] STEHLÍK, Petr. *Up-to-date waste-to-energy approach*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-319-15466-4.
- [42] Porovnání nákladů na vytápění, teplou vodu a elektrickou energii. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2019, s. 1 [cit. 2019-02-21]. ISSN 1801-4399.
- [43] *Výroční zpráva 2017 Elektrárna Dětmárovice*. 1. Dětmárovice: ČEZ, 2018. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/detmarovice/vz-edee-2017.pdf>
- [44] PAVLAS, Martin. Waste to Energy (W2E) Software. *Ústav procesního inženýrství* [online]. Brno: FSI VUT Brno, c2009-2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.upi.fme.vutbr.cz/w2e/>
- [45] ŠOMPLÁK, Radovan, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Jiří KROPÁČ a Martin PAVLAS. *Justýna – nástroj pro odhad produkce a výhřevnosti komunálních odpadů na úrovni mikroregionů*. In: . 2015, s. 12. Dostupné také z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/017.pdf>
- [46] FERDAN, Tomáš. *Efektivní využití komunálních odpadů v energetice*. Brno, 2017, 91 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [47] SCHOLLEOVÁ, Hana. *Ekonomické a finanční řízení pro neekonomy*. 1. Praha: Grada, 2008. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-2424-9.